



<input type="checkbox"/>	Kandidaatintutkielma
<input checked="" type="checkbox"/>	Pro gradu -tutkielma
<input type="checkbox"/>	Lisensiaatintutkielma
<input type="checkbox"/>	Väitöskirja

Oppiaine	Taloustiede	Päivämäärä	18.5.2021
Tekijä	Eljas Aalto	Sivumäärä	92+liite
Otsikko	Teknologinen kehitys endogeenisissä kasvumalleissa		
Ohjaaja	Prof. Mika Kortelainen		

Tiivistelmä

Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkastellaan, miten teknologista kehitystä voidaan mallintaa eri sukupolvien endogeenisten kasvumallien avulla ja selvitetään, mitkä mallityypit saavat empiirisesti vahvinta tukea. Moderni endogeeninen kasvuteoria juontaa juurensa Romerin (1990) endogeenisen kasvun malliin, jonka tärkeä havainto on mallintaa teknologiaa ja tietoa osittain poissulkevana ja ei-kilpailullisena hyödykkeenä. Koska teknologia on eräs talouden tuotannon panoksista, voi ei-kilpailullisuus luoda tuotannolle kasvavat skaalatuotot kaikkien panostensa suhteen. Lisäksi tiedon kumuloitumisella voi olla monenlaisia positiivisia ulkoisvaikutuksia innovoinnin kannalta, kun uusi tieto läikkyä talouden eri sektoreille.

Myöhempien sukupolvien endogeenisen kasvun mallit ovat pyrkineet vastaamaan Romerin (1990) ja muiden ensimmäisen sukupolven mallien teoreettisiin ja empiirisiin haasteisiin. Niin kutsutuissa semi-endogeenisissä malleissa eksponentiaalisen teknologisen kehityksen aikaansaaminen jatkuvasti vaikeutuu, minkä takia tutkimus- ja kehittämispanoksen on jatkuvasti kasvettava. Schumpeterilaisissa endogeenisissä kasvumalleissa puolestaan väestönkasvun myötä talouden hyödykevariaatioiden määrä kasvaa, mikä jakaa tutkimusresurssit yhä useammalle erilliselle alalle. Schumpeterilaiset mallit ovat 2000-luvulla edustaneet endogeenisen kasvuteorian jonkinasteista teoreettista ja empiiristä konsensusta.

Empiirisen kirjallisuuden uusi haara on tutkia schumpeterilaisissa malleissa keskeisessä asemassa olevaa alakohtaista tasoa. Esimerkiksi Bloom ym. (2020) osoittavat, että eksponentiaalisen kehityksen aikaansaaminen vaatii useiden teknologioiden kohdalla jatkuvasti kasvavaa tutkimuspanosta, eikä tämä havainto ole yhteensopiva schumpeterilaisten mallien kanssa. Tämän tutkielman empiirisessä osiossa esitellyllä tuulienergian alalla on näkyvissä sama ilmiö, sillä tuulienergian tutkimus- ja kehittämistoiminnan panostukset ovat kasvaneet voimakkaasti 2000-luvulla samalla, kun tuulienergiaan liittyvä teknologinen kehitys on ollut tasaista. Yhdysvaltojen teollisuuden toimialoja käsittelevä aggregaattitaso aineisto puolestaan tukee schumpeterilaisia malleja melko hyvin. Empiirinen ristiriita on itsessään hyvin samankaltainen aiempien tutkimusten havaintojen kanssa, sillä eri maiden ja toimialojen aineistoja sekä erilaisia muuttujien proxyja hyödyntäen on saatu hyvin vaihtelevia tuloksia, eikä selkeisiin johtopäätöksiin endogeenisen kasvun kirjallisuudessa ole voitu päästä.

Avainsanat	kasvuteoriat, tutkimus- ja kehittämistoiminta, tuottavuus
------------	---

TEKNOLOGINEN KEHITYS ENDOGEENISISSA KASVUMALLEISSA

Taloustieteen
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Eljas Aalto

Ohjaaja:
Prof. Mika Kortelainen

18.5.2021
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MITÄ TARKOITETAAN TEKNOLOGIALLA?	12
	2.1 Teknologia ja tutkimus taloustieteellisinä käsitteinä.....	12
	2.2 Teknologian kehityksen mittaaminen	16
	2.3 Hidastuuko teknologian kehitys?	19
3	ENDOGEENISTEN KASVUMALLIEN TEORIA.....	21
	3.1 Kohti endogeenisen teknologisen kehityksen malleja.....	21
	3.2 Romerin kasvumalli.....	22
	3.2.1 Mallin kuvaus	23
	3.2.2 Mallin yleinen tasapaino	27
	3.2.3 Mallin tulkinta.....	29
	3.3 Semi-endogeeniset kasvumallit	30
	3.4 Schumpeterilaiset endogeeniset kasvumallit	33
	3.5 Neljännen sukupolven endogeeniset kasvumallit.....	37
4	ENDOGEENISTEN MALLIEN EMPIIRISET SOVELLUKSET	40
	4.1 Empiirisen tutkimuksen lähestymistavat	40
	4.2 Ensimmäisen sukupolven mallit ja skaalavaikutus	43
	4.3 Semi-endogeeninen vai schumpeterilainen kasvu?.....	44
5	TAPAUSTUTKIMUS: TUULIENERGIA	49
	5.1 Metodi ja tavoitteet	49
	5.2 Tuulivoimaan liittyvä teknologinen kehitys	50
	5.3 Aineisto.....	53
	5.4 Tulokset.....	54
	5.5 Huomioita	56
6	MALLIEN TESTAUS TEOLLISUUDEN AINEISTOLLA.....	58
	6.1 Metodi	58
	6.1.1 Yksikköjuuritestit.....	58

6.1.2	Kokonaistuottavuuden kasvua selittävä malli	59
6.1.3	Meta-tuotantofunktion suora estimointi.....	61
6.2	Aineisto	62
6.3	Estimointi ja tulokset.....	68
6.3.1	Yksikköjuuritestit.....	68
6.3.2	Kokonaistuottavuuden kasvua selittävä malli	69
6.3.3	Meta-tuotantofunktion suora estimointi.....	71
6.4	Tulkintaa ja huomioita	73
7	LOPPUPÄÄTELMÄT	77
	LÄHTEET	83
	LIITTEET.....	93
	Liite 1. Tuuliturbiineja valmistavat yritykset ja T&K-menot.....	93

KUVIOLUETTELO

Kuvio 1. Tuulienergiaan liittyvä teknologinen kehitys.....	53
Kuvio 2. Tuulienergian tutkimuspanos ja teknologian kehitysaste.	55
Kuvio 3. Yhdysvaltojen teollisuussektorin tutkimusintensiteetin kehitys (1981=1).	66
Kuvio 4. Yhdysvaltojen teollisuussektorin kokonaistuottavuuden kasvuaste.	67

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Tuulienergian tutkimuspanoksen ja tutkijoiden tuottavuuden muutos.	56
Taulukko 2. Paneeliyksikköjuuritestien tulokset.	68
Taulukko 3. Kokonaistuottavuuden kasvua selittävän mallin tulokset: 5-vuotiset differenssit.....	70
Taulukko 4. Kokonaistuottavuuden kasvua selittävän mallin tulokset: 9-vuotiset differenssit.....	71
Taulukko 5. Meta-tuotantofunktion suoran estimoinnin tulokset.	73

1 JOHDANTO

Taloushistoria tuntee useita teknologisia läpimurtoja, jotka ovat mullistaneet yhteiskuntaa. Talouden tuotannon kannalta yhtenä merkittävimmistä tapahtumista voidaan pitää höyrykoneen keksimistä ja sen mahdollistamaa ensimmäistä teollista vallankumousta, joka käynnistyi Britanniassa 1700- ja 1800-lukujen vaihteessa. Tämä teollisten tuotantomenetelmien voimakas muutos käynnisti nopean tuottavuus- ja talouskasvun levitessään ympäri nykyistä kehittyntä maailmaa. Kasvupyrähdys ei jäänyt kuitenkaan ainoaksi, sillä niin kutsuttu toinen teollinen vallankumous jatkoi teollisuuden murrosta 1800-luvun lopulla erityisesti sähkön ja polttomoottorin keksimisen myötä, ja vuosisataa myöhemmin informaatioteknologia (IT) synnytti kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi kutsutun nopean kasvun uuden ajanjakson. 2000-luvulla kiihtynyttä tuotannon automatisointia sekä älykkään teknologian ja esineiden internetin nousua on puolestaan kutsuttu neljänneksi teolliseksi vallankumoukseksi.

Nämä taloutta ravistelleet tuotannon ja tuotantomenetelmien suuret muutokset ovat olleet seurausta tiedon ja teknologian kehityksestä. Näin ollen voidaan sanoa, että aiemmin alkanut tieteen vallankumous länsimaissa raivasi tietä myöhemmälle teollistumiselle. Myös taloustieteen selkeä johtopäätös on, että tiedon ja teknologisen osaamisen kehitys lisäävät talouden tuottavuuskasvun edellytyksiä, ja tuottavuuskasvu puolestaan nostaa tuloissa mitattua elintasoja. Siten pitkällä aikavälillä tavanomaisilla mittareilla mitattu elintason kasvu kulkee käsi kädessä teknologian kehittymisen kanssa. Tämän havainnon pohjalta on helppo argumentoida, miksi koulutuksen, tieteen ja tutkimuksen taloudellinen merkitys on suuri ja niiden korkea prioriteetti perusteltu.

Talouden kasvumalleja, joissa teknologista kehitystä ja sen tuottavuusvaikutuksia pyritään selittämään mallissa itsessään, kutsutaan endogeenisiksi kasvumalleiksi. Näissä malleissa tieteesen ja tutkimus- ja kehittämistoimintaan (T&K) voidaan allokoida osa talouden niukoista resursseista, minkä seurauksena syntyy uusia tuottavuutta parantavia ideoita. Teknologian kehitys ei siis ole ulkoa annettu eksogeeninen muuttuja. Endogeenisen kasvun mallien uranuurtajina voidaan pitää Romerin (1986; 1990), Grossman & Helpmanin (1991) sekä Aghion & Howittin (1992) tutkimuksia, jotka ensimmäisinä muotoilivat mikroteoreettisille perusteille rakennetun, teknologista kehitystä selittävän mallikehikon. Romerin pitkä työ endogeenisen kasvuteorian parissa palkittiin vuonna 2018 myös taloustieteen Nobel-palkinnolla.

Endogeenisissa malleissa yritysten on mahdollista saavuttaa kilpailuetu muihin nähden luomalla uusia teknologioita. Tämän kilpailuedun mahdollistaa uuden tiedon osittainen poissulkevuus: esimerkiksi patenttien avulla on mahdollista estää muita hyödyntämästä samaa teknologiaa. Muuten teknologialla on kuitenkin julkishyödykkeen ominaisuudet, sillä kaikki voivat käyttää samaa tietoa, eikä yhden käyttö rajoita muita käyttämästä sitä. Teknologia on siis osittain poissulkeva, ei-kilpailullinen hyödyke. Jos talouden tuotantofunktiolle mallinnetaan vakioiset skaalatuotot muiden panosten suhteen, antaa teknologiapanoksen ei-kilpailullisuus tuotantofunktiolle kasvavat skaalatuotot kaikkien panostensa suhteen. (Romer 1986; 1990.)

Kasvavista skaalatuotoista johtuen Romerin (1990), Grossman & Helpmanin (1991) sekä Aghion & Howittin (1992) niin kutsutuissa ensimmäisen sukupolven malleissa henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuvauhdin oletetaan riippuvan tutkimuspanoksen tasosta: esimerkiksi tutkimuksen määrän kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa teknologian ja tuotannon kasvuasteen. Tätä ilmiötä kutsutaan endogeenisen kasvun malleissa skaalavaikutukseksi. Skaalavaikutukset johtavat kuitenkin usein hankaliin ”räjähtävän kasvun” lopputulemiin, sillä esimerkiksi tasainen väestönkasvu tarkoittaa malleissa kasvuasteen karkaamista äärettömyyteen. Tämänkaltaiset teoreettiset ongelmat ovat jo kolme vuosikymmentä pitäneet keskustelun endogeenisista kasvumalleista kiivaina, ja lukuisia erilaisia ratkaisuja on tarjottu.

Bond-Smithin (2019) mukaan endogeeniset mallit voidaan jakaa neljän eri sukupolven malleihin: ensimmäisen sukupolven, semi-endogeenisiin, schumpeterilaisiin ja neljännen sukupolven malleihin. Nämä kaikki mallit pitävät sisällään erilaiset oletukset siitä, miten T&K-toiminta uutta teknologiaa tuottaa ja millä tavalla tieto ja teknologia läikkyvät eri talouden toimijoiden välillä. Tätä funktiomuotoista spesifiointia voidaan kutsua esimerkiksi ”ideoiden tuotantofunktioksi” (esim. Bloom ym. 2020) tai ”meta-tuotantofunktioksi” (Acemoglu 2009, 413). Tässä tutkielmassa käytetään funktiosta tästedes jälkimmäisenä mainittua nimitystä.

Toisen sukupolven mallit syntyivät alun perin Jonesin (1995a), Kortumin (1997) ja Segerstromin (1998) muotoillessa Romerin (1990) mallin oletuksia uudelleen. Näissä niin kutsutuissa semi-endogeenisissa malleissa myös tutkimustyöhön pätee laskevan rajatuotoksen laki, mistä johtuen eksponentiaalisen teknologisen kehityksen aikaansaaminen jatkuvasti vaikeutuu. Tutkimuksen määrän on siksi jatkuvasti kasvettava kasvun ylläpitämiseksi, ja mallien tasapainoisella kasvu-uralla talouden henkeä kohden

lasketun tuotannon kasvun määrittääkin lopulta vain väestön kasvuaste, joka on yleensä eksogeeninen muuttuja.

Kolmas mallisukupolvi, eli niin kutsutut schumpeterilaiset endogeeniset mallit (esim. Dinopoulos & Thompson, 1998; Peretto, 1998; Young, 1998) rajoittavat ”räjähtävää kasvua” toisella tavalla. Näissä malleissa innovointia tapahtuu kahteen suuntaan, sillä sekä tuotevariaatioiden määrä että tuotteiden laatu paranevat. Näitä kahta erilaista innovoinnin ulottuvuutta kutsutaan kirjallisuudessa myös horisontaaliseksi ja vertikaaliseksi innovoinniksi. Schumpeterilaisissa malleissa skaalavaikutus pätee yksittäisen yrityksen tai talouden toimialan tasolla, mutta talouden lisääntyvä tuotevariaatioiden määrä jakaa tutkimuspanoksen yhä useammalle alalle, ja tämä rajoittaa talouden kasvuasteita aggregaattitasolla. Pitkän aikavälin kasvuaste malleissa on kuitenkin edelleen sidoksissa T&K-panokseen, joten kolmatta mallisukupolvea voidaan ensimmäisen ohella kutsua täysin endogeeniseksi.

Bond-Smithin (2019) mukaan niin kutsutut neljännen sukupolven endogeeniset mallit puolestaan pohjautuvat Peretton (2018) tutkimukseen, joka on eräänlainen synteesi eri mallityyppien välillä. Bond-Smith (2019) argumentoi, että neljännen sukupolven mallit saattavat muodostaa lopullisen konsensuksen aiheen teoreettisessa keskustelussa, sillä Peretton (2018) mallissa aiempien endogeenisten mallien hankalista oletuksista on irtauduttu samalla kuitenkin säilyttäen mallien tärkeimmät ominaisuudet.

Mikä on näiden eri sukupolvien endogeenisten mallien suhde reaali maailman havaintoihin teknologian kehityksestä? Onko uusien innovaatioiden luominen jatkuvasti yhä haastavampaa, kuten semi-endogeenisissä malleissa? Empiiriset tutkimukset ovat antaneet aavistuksen enemmän tukea schumpeterilaisille malleille muiden sijaan, mutta Bloomin ym. (2020) tuore tutkimus valaisee aihetta uudella tavalla mikrotasolla. Tutkimus osoittaa tutkijoiden ja tutkimuksen määrän kasvaneen lähes kaikilla talouden tasoilla vailla yhteyttä tuottavuuden kasvuasteisiin. Tämä sotii schumpeterilaisten mallien hypoteeseja vastaan, sillä näissä malleissa voidaan alakohtaisesti saavuttaa vakioinen tuottavuuden kasvu vakioisella tutkimuspanoksella. Bloom ym. (2020) tulkitsevatkin, että tutkijoiden ”tuottavuus” heikkenee jatkuvasti. Esimerkiksi elektroniikkateollisuudelle tärkeä teknologian säännönmukaista kehitystä ja tietokoneiden tehoa kuvaava laki, Mooren laki, on 1960-luvulta asti pitänyt: mikropiirien komponenttimäärä on kaksinkertaistunut 1–2 vuoden välein, ja vasta 2010-luvulla jonkinlaista hidastumista on ollut havaittavissa. Laki peittää alleen sen, että samalla niin kutsuttu efektiivinen tutkijoiden määrä alalla on 18-kertaistunut, ja siten alan tutkijoiden

tuottavuus on vastaavalla kertoimella heikentynyt. Tutkijat argumentoivatkin, että tutkijoiden tuottavuuden heikkeneminen voisi osittain selittää 2000-luvulla havaittua tuottavuuskasvun hidastumista länsimaissa.

Tämän tutkielman tarkoitus on endogeenisten kasvumallien teorian, aiemman kirjallisuuden sekä uusien empiiristen esimerkkien avulla selvittää, onko kasvu ja innovointi täysin endogeenista vai semi-endogeenista, onko tutkimustyön tuottavuus todella laskussa, ja millaisia seurauksia tällä on teknologisen kehityksen ja talouden kasvun kannalta. Bloom ym. (2020) tutkivat tutkijoiden tuottavuuden kehitystä hyödyntämällä tapaustutkimuksia muun muassa puolijohteiden, lääketieteen ja maatalouden aloilta, mutta energiateknologia ei ajankohtaisuudestaan huolimatta ole edustettuna. Tämän johdosta tutkielma pyrkii jatkamaan Bloomin ym. (2020) kehittämää asetelmaa esittelemällä aivan uuden mikrotason tapaustutkimuksen tuulienergian alalta. Tämän lisäksi tutkielma testaa eri sukupolven endogeenisten mallien hypoteeseja aggregaattitasolla Yhdysvaltain teollisuussektorin käsittävän aineiston avulla. Tarkastelussa hyödynnetään tuottavuuskasvua ja patentointia teknologisen kehityksen ja innovoinnin mittareina, ja lisäksi hyödykevariaatioita pyritään tarkastelussa mittaamaan erilaisilla uusilla suorilla mittareilla. Bloomin ym. (2020) havaintojen pohjalta eri sukupolvien mallien hypoteeseja testataan aggregaattitasolla uudenlaisen asetelman avulla, jossa hyödykevariaatiota kohden lasketun tutkimuspanoksen on jatkuvasti kasvettava tasaisen kasvun ylläpitämiseksi.

Lopulta kysymys siitä, onko teknologisten läpimurtojen saavuttaminen yhä vaikeampaa, on ennen kaikkea filosofinen kysymys, kuten Romer (1990) mainitsee. Tutkielma pyrkii kuitenkin tunnistamaan havaittavissa olevia säännönmukaisuuksia teknologian, innovaatioiden ja tutkimuksen välillä. Näillä syy-seuraussuhteilla voi olla suuri merkitys sen kannalta, miten ja millaista T&K-toimintaa ja -tukipolitiikkaa taloudessa tulisi harjoittaa. Lisäksi johtopäätökset voivat valaista teknologian ja tuottavuuden kasvun hyvin pitkän aikavälin näkymiä.

Tutkielma rakentuu sekä teoreettisiin että empiirisiin osioihin. Luvussa 2 selvitetään, mitä teknologia taloustieteellisesti tarkoittaa, ja miten sen kehitystä voidaan mitata ja tarkastella kasvutilinpidossa. Lisäksi luku käy läpi argumentteja, joiden mukaan teknologinen kehitys on kehittyneissä maissa taantunut. Luvussa 3 esitellään eri sukupolvien endogeenisten kasvumallien teoriaa, ja erityisesti Romerin (1990) tunnettu malli, joka on taloustieteen klassikko. Luku 4 puolestaan keskittyy aiempaan empiiriseen kirjallisuuteen ja esittelee eri mallisukupolvien empiiristä tukea. Tutkielman

tuulienergiaa käsittelevä empiirinen osuus on esitelty luvussa 5, ja luku 6 keskittyy Yhdysvaltojen teollisuuden toimialojen empiiriseen aineistoon. Luku 7 tiivistää tärkeimmät havainnot ja esittää niihin nojautuvaa pohdintaa.

2 MITÄ TARKOITETAAN TEKNOLOGIALLA?

2.1 Teknologia ja tutkimus taloustieteellisinä käsitteinä

Taloustieteen selkeä johtopäätös on, että talouden ja elintason pitkän aikavälin kasvua selittää kaikkein vahvimmin teknologinen kehitys. Laskevan rajatuotoksen lain alaisuudessa työn lisäämisen ja pääoman akkumuloinnin elintasoja nostava vaikutus on rajallinen, joten huomio keskittyy tuottavuuden ja teknologian merkitykseen. Analyysin kannalta oleellista onkin määritellä teknologia taloustieteellisenä käsitteenä ja erotella sen merkitys arkikieleen nähden.

Taloustieteessä teknologian käsite liittyy vahvasti juuri tuotantoon. Talouden kasvutilinpidossa teknologisella kehityksellä viitataan yleensä sellaiseen tuotannon kasvuun, joka ei liity suoraan tuotantopanoksien eli työn ja pääoman määrien lisäykseen. Näin ollen teknologia on tietoa siitä, miten käytetyistä tuotantopanoksista luodaan uusia hyödykkeitä. Teknologian kehittyminen tarkoittaa, että uusia hyödykkeitä voidaan luoda yhä tehokkaammin, ja uudet hyödykkeet ovat entistä laadukkaampia. Teknologinen tieto saa tässä yhteydessä hyvin laajan merkityksen kattaen valtavan jatkumon erilaista osaamista, ja se pitää sisällään esimerkiksi yleiset matemaattiset aksioomat ja erilaisten laitteiden toiminnan yksityiskohdat. Kaikella tällä tiedolla on oma merkityksensä talouden tuottavuuden kehityksen kannalta. (Romer 2012, 116.)

On tärkeää havaita, että teknologia saa usein julkishyödykkeen merkityksen. Se on siis tietoa, joka on eräänlainen kaikkien talouden yksiköiden vapaasti käytettävissä oleva aineeton hyödyke, ja joka ei ole kilpailullista eikä poissulkevaa. Julkishyödykkeen ei-kilpailullisuus viittaa siihen, että hyödykkeen käyttö yhden talouden yksikön toimesta ei estä muita käyttämästä samaa hyödykettä. Ei-poissulkevuus puolestaan tarkoittaa, että hyödykkeen käyttäjän on mahdotonta estää muita käyttämästä samaa hyödykettä. Onkin selvää, että useat talouden yksiköt voivat hyödyntää samaa teknologista osaamista tai tietoa samanaikaisesti, mikä tarkoittaa teknologian ei-kilpailullisuutta. Patenttijärjestelmän avulla teknologiasta voidaan tehdä kuitenkin myös osittain poissulkevaa, joten teknologia ei aina ole puhdas julkishyödyke. (Romer 2012, 117.)

Teknologinen tieto on helppo sekoittaa henkisen pääoman käsitteen kanssa, joka yhtä lailla on talouden kasvuteoriassa tärkeä. Mankiw (1995) määrittelee teknologian olevan kaikkien teknologisten ja tieteellisten löydösten summa, ja tämä yhteenlaskettu tieto löytyy esimerkiksi kirjoista, artikkeleista ja internetistä, kun taas henkinen pääoma on

opiskelun myötä ”ihmisen aivoihin siirtynyttä tietoa”. Romerin (1990) tärkeä huomautus onkin, että henkisen pääoman erottaa teknologiasta sen kilpailullinen luonne: samaa henkistä pääomaa eivät voi käyttää kaikki talouden yksiköt yhtä aikaa, koska se on sidottu ihmisyksilöihin. Teknologian kohdalla näin ei ole.

Romerin (1986; 1990) tärkeä kontribuutio kasvuteoriaan on ollut teknologian ei-kilpailullisen luonteen analyysi. Tämä ei-kilpailullisuus johtaa tuotantofunktion kasvaviin skaalatuottoihin. Olkoon $F(K, L, A)$ talouden tuotantofunktio, joka kuvaa kokonaistuotantoa pääoman K , työvoiman L ja teknologian A funktiona. Usein taloustieteen kasvumalleissa tuotantofunktiolla oletetaan olevan vakioiset skaalatuotot pääoman ja työn suhteen, joten esimerkiksi työn ja pääoman kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa myös tuotannon. Tämä voidaan perustella esimerkiksi siten, että yhden tuotantolaitoksen taloudessa toisen identtisen tuotantolaitoksen perustaminen identtisillä panoksilla synnyttää täsmälleen saman määrän uutta lopputuotantoa, jos ulkoisvaikutuksia ei esiinny. Jos kuitenkin teknologia on kaikkien vapaasti käytettävissä, ei tuotannon kaksinkertaistaminen vaadi teknologian kaksinkertaistamista: olemassa olevaa tietoa voi hyödyntää myös toinen tuotantolaitos. Siten tiedon ei-kilpailullisuus antaa tuotannolle kasvavat skaalatuotot pääoman, työn ja teknologian suhteen. (Acemoglu 2009, 413–414.)

Käytännössä uutta teknologista tietoa syntyy uusien ideoiden ja innovaatioiden kautta. Innovaatioiden seurauksena voi syntyä kokonaan uusia tuotteita, jolloin hyödykevariaatioiden määrä kasvaa. Tällaisia innovaatioita kutsutaan tuoteinnovaatioiksi tai horisontaalisiksi innovaatioiksi, ja esimerkkinä toimii hyvin muun muassa DVD-soittimen keksiminen. Toisaalta innovaatiot voivat parantaa olemassa olevien hyödykkeiden laatua tai tehdä niiden tuottamisesta edullisempaa, jolloin innovaatioita kutsutaan prosessi-innovaatioiksi tai vertikaalisiksi innovaatioiksi. Tällaisesta innovaatiosta on kyse esimerkiksi silloin, kun entistä laadukkaampi DVD-soitin kehitetään, tai toisaalta nykyisen mallin tuottaminen tulee mahdolliseksi aiempaa pienemmin kustannuksin. Laatua parantavilla ja hintaa laskevilla prosessi-innovaatioilla on hyvin identtiset vaikutukset kasvumalleissa, joten ne voidaan perustellusti rinnastaa. Lisäksi myös tuote- ja prosessi-innovaatiot voidaan usein matemaattisesti rinnastaa. (Acemoglu 2009, 412.)

Innovaatiot voidaan jakaa myös niin kutsuttuihin makro- ja mikroinnovaatioihin. Makroinnovaatioilla tarkoitetaan suuria keksintöjä, jotka vaikuttavat hyvin laajasti moniin eri tuotantolinjoihin, ja tällaiset teknologiat ovat usein niin kutsuttuja

yleiskäyttöisiä teknologioita. Yleiskäyttöisiä teknologioita ovat muun muassa höyrykone, sähkö ja internet. Mikroinnovaatiot puolestaan rakentuvat usein jonkin yleiskäyttöisen teknologian pohjalle ja vaikuttavat yleensä vain yksittäisten hyödykkeiden laatuun tai kustannuksiin. (Acemoglu 2009, 412–413.)

Julkinen tutkimus, kuten yliopistot, sekä yritysten tutkimus- ja kehittämistoiminta (T&K) ovat toimintaa, jonka tavoitteena on uuden tiedon ja innovaatioiden luominen. T&K-toiminnan voidaan sanoa olevan ominaisuuksiltaan uutta tietoa tavoittelevaa, luovaa, onnistumisen suhteen epävarmaa, systemaattista ja tuloksiltaan siirrettävissä olevaa ja/tai toisinnettavaa. T&K-toiminnan voi myös jakaa kolmeen osaan: perustutkimukseen, soveltavaan tutkimukseen ja kehittämistyöhön. Perustutkimuksen tavoitteena on usein uuden tieteellisen tiedon tuottaminen vailla suoraa käytännön sovellusta, ja se muodostuu esimerkiksi erilaisten tieteellisten teorioiden, hypoteesien, syy- ja seuraussuhteiden analysoinnista. Soveltava tutkimus etsii käytännön sovelluksia uudelle tiedolle, ja kehittämistyö puolestaan pyrkii tutkimuksen ja käytännön kokemuksen avulla syntyneen tiedon avulla luomaan uusia menetelmiä, tuotteita tai prosesseja, tai vastaavasti parantamaan jo olemassa olevia. (Tilastokeskus 2021.)

Perustutkimusta suorittavat usein yliopistot, ja sen lopputuloksena syntyy melko vapaasti käytettävissä olevaa tieteellistä tietoa. Perustutkimuksella on positiivisia ulkoisvaikutuksia, joiden nojalla yliopistotutkimuksen julkinen rahoittaminen on perusteltua. Julkisen lisäksi myös yksityisestä T&K-toiminnasta koituu monenlaisia ulkoisvaikutuksia, joita ovat esimerkiksi kuluttajan ylijäämän vaikutus (engl. consumer-surplus effect), varastamisvaikutus (engl. business-stealing effect) ja T&K-vaikutus (engl. R&D effect). Näistä ensimmäinen ulkoisvaikutus kuvaa positiivista ylijäämää, joka syntyy kuluttajien tai tuottajien ostaessa käyttöönsä teknologioita tai ideoita niiden kehittäjiltä, kun kehittäjät eivät voi harjoittaa täydellistä hintadiskriminaatiota. Toinen vaikutus kuvastaa negatiivista ulkoisvaikutusta, joka syntyy uusien parempien teknologioiden vahingoittaessa vanhojen teknologioiden omistajien asemaa markkinoilla. Kolmas ulkoisvaikutus on puolestaan positiivinen ja seurausta siitä, että olemassa oleva tieto ja teknologia on yleensä tutkimussektorilla vapaassa käytössä. Uuden tiedon luominen siis vaikuttaa positiivisesti kaikkiin toimijoihin tutkimussektorilla tiedon läikkymisen (engl. spillover) seurauksena. (Romer 2012, 118–119.)

Näiden ulkoisvaikutusten nettovaikutusta pidetään useimmiten positiivisena, minkä seurauksena myös yksityisen T&K-toiminnan taso saattaa olla tasapainossa optimaalista matalampi. Siten T&K-toiminnan tuilla voidaan potentiaalisesti kasvattaa hyvinvointia.

Esimerkiksi Jones & Williams (1998) ovat laskeneet optimaalisen T&K-panoksen Yhdysvalloissa olevan huomattavasti toteutunutta korkeampi.

Toisaalta uutta tietoa voi syntyä myös tuotannon itsensä seurauksena, kun tuotanto johtaa niin kutsuttuun tekemällä oppimiseen (engl. learning by doing). Tekemällä oppiminen viittaa hyödykkeiden tuotantoprosessissa tapahtuvaan osaamiseen kasvuun, joka voi käytännössä toteutua monella tavalla. Tuotannossa mukana olevat työntekijät esimerkiksi oppivat ja hahmottavat yhä tehokkaampia tapoja hoitaa tuotantoprosessin vaiheet, vaikka varsinaista tarkoituksellista tutkimusta ei hyödykkeen kohdalla tapahtuisikaan. Teknologinen kehitys ja innovaatiot ovat tällöin tuotannon positiivinen ulkoisvaikutus eli eräänlainen sivutuote. Tekemällä oppimisen toteutuminen käytännössä näkyy esimerkiksi niin kutsuttujen oppimis- tai kokemuskäyrien avulla (engl. learning curve/experience curve). Näiden konseptien keskeinen ajatus on, että tuotantokustannukset hyvin ennustettavalla tavalla laskevat tuotannon ja tuotantokokemuksen kumuloitumisen myötä. Tämä on myös empiirisesti havaittu säännönmukaisuus. (Thompson 2010.)

Innovaatioiden ja uuden tiedon luomisen kannusteet voivat olla moninaisia. Usein korostetaan, miten perustutkimuksen luoman tieteellisen tiedon kehitys on ollut autonomista ja tapahtunut tieteen edistyessä tiedon itseisarvoisen aseman, tai kenties tutkijoiden oman kuuluisuuden tavoittelun vuoksi. Markkinoiden kannusteilla ja voitoilla ei ole ollut tällöin suurta merkitystä edistyksen kannalta (ks. esim. Ceruzzi 2003; Rosenberg 1976). Tällaista perustutkimusta ovat suorittaneet niin keskiaikaiset luostarit kuin modernit yliopistotkin. Lisäksi tieteen kehitykseen ovat vaikuttaneet vahvasti poikkeukselliset yksilöt ja heille kohdistetut erityiset kannusteet (Romer 2012, 120–121).

Toisaalta vahvin näkemys taloustieteessä on, että juuri taloudellisilla kannusteilla ja voitontavoittelulla on ollut elintärkeä rooli innovaatioiden syntymisen kannalta (Acemoglu 2009, 415–416). Kuten edellä mainittiin, yksityisten kannusteiden syntyminen edellyttää jonkinlaista teknologian poissulkevuutta, jonka mahdollistavat erityisesti eri valtioiden patenttijärjestelmät. Poissulkevuus synnyttää yksityisiä kannusteita tiedon luomiseen, kun muut yritykset eivät voi toimia vapaamatkustajina imitoiden ilmaiseksi muiden kehittämiä teknologioita. Kuitenkin toisaalta myös liikesalaisuudet tai muiden yritysten teknologian imitointiin kuluva aikaviive voivat antaa teknologiaa kehittäneille yrityksille väliaikaisen kilpailuedun muihin nähden (Acemoglu 2009, 398).

2.2 Teknologian kehityksen mittaaminen

Analyysin kannalta tärkeää on myös tarkastella, miten teknologian kehitystä voidaan pyrkiä mittaamaan. Eräs intuitiivisimmista ja käytetyimmistä työkaluista mitata tiedon ja innovoinnin tasoa on patenttikanta. Patentti on omistusoikeus tiettyyn keksintöön ja antaa siten määräaikaista monopoliaseman keksittyyn ideaan. Jokainen patentti kuvaa siis jonkinlaista uutta ideaa tai innovaatiota. Patentteja pidetään ehkä parhaana mittarina sekä tiedon tason että uusien innovaatioiden mittaamiseen, sillä patenttimäärillä on voimakas yhteys T&K-toiminnan tasoon (Griliches 1990), ja patentointi pitää sisällään myös virallisen T&K-toiminnan ulkopuolella tapahtuvan innovoinnin. Tämä mahdollistaa myös patenttien käyttämisen tutkimuspanoksen epäsuorana mittarina. Patenttiaineisto, joka on yleensä avoimesti saatavilla, mahdollistaa lisäksi innovaatiotoiminnan vertailun eri ajanjaksojen, alojen ja maiden välillä. Patenttien luonne on kuitenkin saattanut ajan saatossa muuttua: nykyajan patentit ovat usein erilaisia algoritmeja ja sovelluksia, mikä erottaa ne voimakkaasti menneiden vuosikymmenten keksinnöistä. Tämä voi tehdä innovaatioiden ja patenttien välisestä suhteesta epävakaa ajan saatossa (Lanjouw & Schankerman 2004). Toisaalta patenttien pelkän lukumäärän tarkastelu voi sivuuttaa sen, että joidenkin keksintöjen vaikutus ja merkitys on vahvempi kuin toisten, ja on myös paljon innovaatioita, jotka eivät ole patentoitavissa.

Joillakin aloilla teknologisen vertikaalisen kehityksen mittaaminen on hyvin suoraviivaista: esimerkiksi useat nimetyt säännönmukaisuudet kuvaavat suoraan eri teknologioiden kehitystä. Näitä ”lakeja” ovat esimerkiksi Mooren laki, Haitzin laki ja Hendyn laki, joista ensimmäinen kuvaa prosessorien transistorimäärän kaksinkertaistumista 1–2 vuoden välein, keskimäinen LED-valojen valovoiman ja tehokkuuden kaksinkertaistumista 36 kuukauden välein, ja jälkimmäinen tietyille alueelle upotettavissa olevan pikselimäärän kaksinkertaistumista 18 kuukauden välein. Nämä säännönmukaisuudet siis kvantifioivat suoraan eri alojen vertikaalisen kehitysvauhdin. Esimerkiksi Bloom ym. (2020) ovat tarkastelussaan käyttäneet teknologisen kehityksen indikaattoreina erilaisia suoraa mittareita.

Horisontaalisen innovoinnin ja teknologisen kehityksen mittaaminen osoittautuu jonkin verran haastavammaksi kuin vertikaalisen. Ehkä tunnetuin tapa mitata tuotevariaatioita on alun perin Feenstran (1994) kehittämä strategia, jossa mallinnetaan hyödykevariaatioiden yhteyttä tuontihintoihin. Tähän liittyen Broda & Weinstein (2006) mittaavat tuontihyödykevariaatioiden kasvua ja sen hyvinvointivaikutuksia

Yhdysvalloissa kategorisoimalla erilaisia tuontihyödykkeitä niin, että eri maissa tuotetut hyödykkeet tulkitaan eri variaatioiksi. Laincz & Peretto (2006) puolestaan olettavat tuotantolinjojen lukumäärän heijastelevan tuotevariaatioiden lukumäärää, Gao & Hitt (2004) argumentoivat tavaramerkkien määrän heijastelevan variaatioiden määrää erityisesti silloin, kun tavaramerkkiä kohden valmistettavien hyödykkeiden määrä pysyy vakiona, ja Klenow & Bils (2001) arvioivat variaatioiden kasvua siitä, miten usein Yhdysvaltain työvoimatilasto muuttaa kuluttajahintaindeksin laskemiseen käytetyn hyödykekorin tuotevalikoimaa.

Aggregaattitasolla teknologian ja innovaatioiden vaikutusta voidaan mitata kansantalouden tilinpidon avulla. Solow'n (1957) kehittämän klassisen kasvutilinpidon tapa erotella teknologinen kehitys talouden kasvun selittäjänä on mallintaa tuotantoa Y kolmen panoksen funktiona: työn L , pääoman K ja teknologian A . Tämänkaltaisen tuotantofunktio F saa usein yksinkertaisen Cobb-Douglas-muodon:

$$Y(t) = F(K(t), L(t), A(t)) = A(t)K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (2.1)$$

Tässä t viittaa ajanhetkeen, ja potenssit α ja $1 - \alpha$ ovat panosjoustoja. Teknologiaa kuvaava termi on tämänkaltaisessa kasvutilinpidossa vain tuotantofunktion kerroin, joka pitää sisällään kaikki muut tuotantoon vaikuttavat tekijät kuin panosten määrien muutokset. Teknologia saa siis tässä yhteydessä hyvin laajan merkityksen, ja sen yksikkö määritellään tilinpidossa numeerisesti, vaikka onkin konseptiltaan melko abstrakti. Tämä Solow'n luoma kasvutilinpidon konsepti on taloustieteessä edelleen kaikkein yleisin, ja sitä voidaan soveltaa myös alakohtaisesti.

Seuraavassa noudatetaan Acemoglun (2009) esitystapaa. Derivoimalla tuotantofunktion yleinen muoto $F(L(t), K(t), A(t))$ ajan suhteen saadaan:

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{F_A A}{Y} \frac{\dot{A}}{A} + \frac{F_K K}{Y} \frac{\dot{K}}{K} + \frac{F_L L}{Y} \frac{\dot{L}}{L}. \quad (2.2)$$

Tässä F_A , F_K ja F_L ovat osittaisderivaattoja eri panosten suhteen. Merkitään lisäksi eri panosten kasvuvauhtia seuraavasti: $g \equiv \dot{Y}/Y$, $g_K \equiv \dot{K}/K$ ja $g_L \equiv \dot{L}/L$. Teknologian kontribuutiota kasvuun puolestaan merkitään seuraavasti:

$$x \equiv \frac{F_A A \dot{A}}{Y \dot{A}} \quad (2.3)$$

Määritellään lisäksi tuotannon panosjoustot merkinnöin $\varepsilon_K \equiv F_K K/Y$ ja $\varepsilon_L \equiv F_L L/Y$, jotka täydellisen kilpailun vallitessa vastaavat panosten tulo-osuuksia. Cobb-Douglas-tuotantofunktion tapauksessa nämä joustot ja tulo-osuudet ovat yhtä suuret kuin panosten potenssit α ja $1 - \alpha$. Nyrkkisääntönä nämä oletetaan usein lukuarvoiltaan 1/3:ksi ja 2/3:ksi, jotka karkeasti vastaavat historiallisia tulo-osuuksia pääomalle ja työlle.

Nyt teknologian kontribuutio x talouden kasvuun voidaan ilmaista seuraavasti:

$$x = g - \varepsilon_K g_K - \varepsilon_L g_L. \quad (2.4)$$

Teknologian kehityksen kontribuutio talouden kasvuun vastaa siis sitä komponenttia talouden kasvusta, joka ei selity työn ja pääoman lisäyksellä. Tätä osaa kasvusta kutsutaan usein kokonaistuottavuuden kasvuksi tai Solow'n residuaaliksi, joka on helppo estimoida kansantalouden tilinpidon aineistoa hyödyntäen. Termi on kuitenkin pelkkä jäännöstermi, joten sen kutsuminen puhtaasti teknologiseksi kehitykseksi voi olla harhaanjohtavaa. Jäännöstermi on kuitenkin se komponentti, joka parhaiten kuvaa innovaatioiden vaikutusta tuotantoon.

Työn laatua voidaan kontrolloida myös tuotantofunktion erillisen henkisen pääoman termin avulla, ja tämä termi kuvaa käytännössä esimerkiksi koulutustasoa. Näin toimien voidaan saada hyvinkin erilaisia estimaatteja teknologian kasvulle. Usein työn tuottavuuskasvun komponentit puretaan kolmeen osaan: pääoman syvenemiseen, eli henkeä kohden lasketun pääoman määrän kasvuun, henkisen pääoman kasvuun sekä kokonaistuottavuuden kasvuun.

Perinteinen kasvutilinpito ei pysty kuitenkaan täysin kuvaamaan kaikkea kehitystä, joka mielletään teknologian kehitykseksi. Jo Griliches (1979) on osoittanut, että kokonaistuottavuus on harhainen mittari eri toimialojen tuottavuuden mittaamiseen. Lisäksi esimerkiksi eri tuotteiden laadun paraneminen ja monet digitaaliset palvelut, kuten internetin ilmainen tieto- ja viihdetarjonta, tuottavat hyvin vaikeasti mitattavissa olevaa kuluttajan ylijäämää, jonka vaikutus kansantalouteen ja hyvinvointiin ei näy tilastoissa (Aghion & Howitt 1998; Byrne 2016). Gordon (2016) huomauttaa kuitenkin, että kasvutilinpidon ulkopuolelle jäävää kuluttajan ylijäämää ja hyvinvoinnin kasvua ovat

synnyttäneet myös menneiden aikojen innovaatiot, kuten televisio ja radio, eikä IT:n tuottaman hyvinvoinnin mittaamisen vaikeudessa ole siten historiallisesti mitään uutta.

2.3 Hidastuuko teknologian kehitys?

On melko helppoa ajatella, että teknologinen kehitys on 2000-luvulla nopeampaa kuin koskaan. Tieteen ja tutkimuksen asema on hyvin vahva, ja lisäksi on selvää, että neljänneksi teolliseksi vallankumoukseksi kutsutun muutoksen elementit ovat selkeästi havaittavissa ympärillämme ja laitteissamme. Taloustieteellisesti ja kasvutilinpidollisesti tarkastellen havainto on kuitenkin ristiriitainen. Kaikkialla länsimaissa on havaittu selkeää pitkään kestänyt tuottavuuden kasvuvauhdin laskutrendi (ks. esim. Bergeaud ym. 2016), joten uusimmat teknologiat eivät ole luoneet paljon puhuttua kasvupyrähdystä. Tilastollisesti näyttää siltä, että teknologian kasvuvauhti on itse asiassa hidastunut eikä kiihtynyt. Muun muassa Cowen (2011) ja Gordon (2016) argumentoivatkin, että tämä innovaatiotoiminnan jähmeys on tullut jäädäkseen pidemmäksikin aikaa: uusimmilla innovaatioilla ei näytä olevan menneiden vuosikymmenten tapaan voimakasta tuottavuusvaikutusta. Cowen (2011) vertaa innovointia ”matalalla roikkuvien hedelmien poimimiseen”, mikä tarkoittaa uusien merkittävien ideoiden keksimisen tulevan haastavammaksi ajan kuluessa.

Anekdoottisella tasolla tilanteesta kertovat useat arkipäivän elämää kuvaavat havainnot. Cowen (2011) ja Gordon (2016) ovat kumpikin nostaneet esille keskenään melko identtisiä kuvauksia siitä, millaisia mullistuksia tavallisen ihmisen elinympäristö koki 1900-luvun alusta aina 1960- ja 1970-luvuille asti. Nämä muutokset liittyvät muun muassa kotitalouteen, lääketieteeseen ja matkustamiseen liittyviin teknologioihin. Sen sijaan viimeisten vuosikymmenten aikana länsimaisen ihmisen tavanomainen toiminta- ja elinympäristö on kokenut vain minimaalisia muutoksia. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii matkustaminen, joka pintapuolisesti tarkastellen tapahtuu aivan samalla nopeudella ja samoilla kulkuvälineillä kuin 70-luvulla. Ainoastaan internetin saatavuus muodostaa merkittävän eron menneisiin vuosikymmeniin nähden. Kehitys onkin kulkenut aivan erilaiseen suuntaan kuin menneiden vuosikymmenten dokumentoiduissa tulevaisuusvisioissa, mitä kuvastaa myös Peter Thielin (2011, viitattu lähteessä The New Yorker 2011) kuuluisaksi noussut, sosiaaliseen mediaan viittaava lakoninen toteamus: ”We wanted flying cars, instead we got 140 characters.”

Jo aiemmin Robert Solow (1987) totesi sarkastisesti IT:n ja tietokoneiden kehityksen näkyvän ympärillä kaikkialla muualla paitsi tuottavuustilastoissa, ja havainto sai nopeasti

”tuottavuusparadoksin” nimekseen. IT:n vaikutusta tuottavuuteen ei voi kuitenkaan väheksyä, sillä 1990-luvun loppupuoliskolta 2000-luvun alkuun Yhdysvaltojen ja useiden muiden läntisten maiden tuottavuuskasvu koki merkittävän nousun, ja tämän nousun syyt jäljitetään usein juuri IT:n ja internetin nousuun. Solow’n voidaan siis sanoa olleen hieman liian aikaisin liikkeellä toteamuksensa kanssa. Lisäksi esimerkiksi Byrne ym. (2016) osoittavat, että kansantalouden tilinpidon mittaustavan aiheuttaman harhan takia tämän nousukauden tuottavuuskasvu on itse asiassa ollut vieläkin korkeampaa.

Byrnen ym. (2016) tutkimuksen hyvä uutinen on, että kansantalouden tilinpito aliarvioi IT:n vaikutuksen tuottavuuteen, mutta toisaalta huono uutinen on se, että huomioimalla tämä vaikutus on vuoden 2004 jälkeinen tuottavuuskasvu tilastoissa hidastunut Yhdysvalloissa itse asiassa entistäkin voimakkaammin. Gordonin (2015; 2016) mukaan kolmannen teollisen vallankumouksen aiheuttama kasvupyrähdys on myös ollut joka tapauksessa huomattavasti heikompi ja lyhytaikaisempi kuin aiempien teollisten läpimurtojen. Niin kutsuttu ”tuottavuusparadoksi 2.0” (Byrne 2016, 149) kuvastaakin paremmin juuri omaa aikaamme ja sen teknologioita: uudet innovaatiot näkyvät kaikkialla, mutta tuottavuus ei kasva. Toisaalta voi olla, etteivät uusimpien teknologioiden ja neljännen teollisen vallankumouksen vaikutukset vielä täysin ole ehtineet levitä taloudessa riittävästi näkyäkseen tuottavuustilastoissa (Byrne 2016, 149–150; Van Ark 2016).

Tuottavuuskasvun laskutrendi on kuitenkin havaittu globaalisti, ja esimerkiksi Syversonin (2016) mukaan hidastuminen eri maissa ei korreloi IT:n käytön tai tuotannon kanssa, joten trendi ei ole yhteydessä IT-alan tuotoksen mittaamisessa mahdollisesti tapahtuvaan harhaan. Taustalla vaikuttavat siis selkeästi makrotaloudelliset tekijät. Nykyistä pitkään jatkunutta pysähtyneisyyden ja hitaan talouskasvun aikaa länsimaissa on kutsuttu myös sekulaariseksi stagnaatioksi, jonka eräs elementti on juuri nihkeä tuottavuuskehitys (ks. esim. Eichengreen ym. 2015; Gordon 2015). Tämä nihkeys voi johtua muun muassa yrityssektorin havaitusta dynaamisuuden heikentymisestä, joka johtaa niin kutsutun luovan tuhon sekä uusien innovaatioiden leviämisen eli diffuusion hidastumiseen (Decker ym. 2016). Toisaalta sekulaarisen stagnaation pohjalta herää kysymys, onko teknologian kehityksen eksponentiaalista kasvua tuottava vaikutus todella heikkenemässä, kuten Gordon (2016) ja Cowen (2011) argumentoivat. Tämän kysymyksen vastauksia voidaan pyrkiä etsimään talouskasvumalleista, jotka selittävät teknologian kehitystä ja sen tuottavuusvaikutuksia endogeenisesti, eli mallikehikossa itsessään. Näitä malleja käsitellään seuraavissa luvuissa.

3 ENDOGEENISTEN KASVUMALLIEN TEORIA

3.1 Kohti endogeenisen teknologisen kehityksen malleja

Jo Solow'n (1956) ja Swanin (1956) kuuluisasta uusklassisesta kasvumallista alkaen on talouden pitkän aikavälin kasvun tekijöistä teknologian kehitystä pidetty yhtenä kaikkein tärkeimmistä. Solow'n mallissa teknologian kehitys on ainoa tekijä, joka pystyy pitkällä aikavälillä turvaamaan henkeä kohden lasketun kokonaistuotannon kasvun, sillä muiden panosten lisäyksillä on vaikutus ainoastaan tuotannon tasoon eikä sen kasvuasteeseen. Teknologia tai tieto on mallissa puhtaan eksogeenista, sillä teknistä kehitystä ei selitetä millään muulla kuin aikatrendillä. Lisäksi tärkeää mallin kannalta on, että teknologia toimii kuin puhdas julkishyödyke: osaaminen ei ole kilpailullista eikä poissulkevaa, sillä kaikki uusi teknologinen osaaminen on kaikkien yritysten vapaasti käytettävissä välittömästi. Voidaan siis ajatella, että teknologian kehitys syntyy jollakin mallinnuksen kannalta täysin ulkopuolisella talouden tai yhteiskunnan sektorilla.

Solow-Swan mallia myöhemmät kasvumallit alkoivat hiljalleen selittää teknologian kehitystä mallissa itsessään. Toisin sanoen teknologiasta tuli mallien endogeeninen muuttuja. Endogeenisen kasvun malleissa keskeistä on, että teknologian kehitys ei ole ulkoa annettu, vaan kehitys voi syntyä esimerkiksi koulutuksen, tieteellisen tutkimuksen, tekemällä oppimisen tai prosessi- ja tuoteinnovaatioiden kautta, jotka otetaan osaksi uusklassista mallia. Tämänkaltaisia elementtejä esiintyi ensimmäisen kerran 60-luvulla julkaistuissa malliehdotuksissa.

Arrow (1962) muotoili teknologisen osaamisen kasvun olevan eräänlainen pääoman tuotannon sivutuote. Yrityksen tuottavuus on alansa menneiden bruttoinvestointien kasvava funktio, sillä uuden tai uudenlaisen pääoman tuotanto johtaa tekemällä oppimiseen ja osaamisen sofistikoitumiseen. Tämä uusi tieto puolestaan läikkyi ympäri taloutta parantaen kaikkien tuottavuutta, joten osaaminen voidaan tulkita jälleen Solow'n mallin tapaan julkishyödykkeeksi, joka on kaikkien saatavilla vapaasti. Yritykset eivät voi kuitenkaan investoida teknologiaa kehittävään tutkimukseen tarkoituksellisesti. Malli pitää sisällään myös ennustuksen, jonka mukaan henkeä kohden lasketun tuotannon kasvu riippuu suoraan työvoiman kasvuasteesta, joten Arrow'n (1962) malli vertautuu itse asiassa suoraan luvussa 3.3 käsiteltäviin semi-endogeenisen kasvun malleihin.

Myös Uzawan (1965) ja Shellin (1967) teknologisen kehityksen mallit olivat askelia kohti uusimpien endogeenisten kasvumallien ominaisuuksia. Näissä malleissa

teknologian kehityksen oletetaan syntyvän erillisellä koulutussektorilla, jolle allokoidaan osa koko työvoimasta. Teknologian kasvuvauhdin oletetaan riippuvan tälle koulutussektorille allokoitun työvoiman suhteellisesta osuudesta, ja koulutussektorilla kertyvän tiedon akkumulointi takaa pysyvän tuotannon kasvun. Kuitenkin koska myös Uzawan (1965) ja Shellin (1967) malleissa teknologisella osaamisella on puhtaan julkishyödykkeen ominaisuudet, ei markkinoilla synny kannusteita tutkimukselle, eikä optimaalista kasvua voi syntyä ilman julkisen tahon interventioita eli niin kutsuttua sosiaalista suunnittelijaa.

Romerin (1986) ja Lucasin (1988) malleissa teknologian ja tuottavuuden kehitys on puolestaan Arrow'n (1962) tapaan sidottu pääoman tuotantoon, joten tekninen kehitys on pääoman akkumuloitumisen positiivinen ulkoisvaikutus. Pääomakanta ja teknologia kulkevat lineaarisessa suhteessa, mutta Romer (1986) mallintaa tekemällä oppimiseen liittyvien ulkoisvaikutusten liittyvän fyysisen pääoman tuotantoon, kun taas vastaavasti Lucasin (1988) mallissa henkisen pääoman tuotanto aiheuttaa ulkoisvaikutukset. Molemmissa malleissa yksittäisille yrityksille käytettävissä oleva teknologinen tieto on ulkoa annettu, mutta koko talouden tasolla se kehittyy endogeenisesti tiedon läikkyessä.

Varhaisilla endogeenisilla malleilla on hyvin erilaisia johtopäätöksiä liittyen pitkän aikavälin kasvuun, sosiaaliseen optimiin ja maiden väliseen konvergenssiin. Erilaiset tekniset ongelmat liittyvät erityisesti teknologian ei-kilpailulliseen ja ei-poissulkevaan luonteeseen. Jos talouden tuotantofunktiolla on ei-kilpailullisesta teknologiapanoksesta johtuen kasvavat skaalatuotot, voi mallin tasapainon etsimiseen liittyvän optimointiongelman kohdefunktio nopeasti kasvaa äärettömyyteen. Lisäksi kilpailullisilla markkinoilla tasapaino saattaa löytyä vain, jos teknologia on yksittäisille yrityksille eksogeeninen. Miten siis voidaan mallintaa yritysten suorittama tutkimus, tai miten ei-kilpailullisuuden mahdollistama ”räjähtävä kasvu” voidaan estää? Tähän Romerin (1990) malli tarjosi lopulta varhaisen ratkaisuehdotuksen, kun dynaamiseen maksimointiongelmaan tuotiin uusia endogeenisuutta lisääviä elementtejä.

3.2 Romerin kasvumalli

Seuraava luku perustuu Romerin (1990) kuuluisaan endogeenisen kasvun malliin, joka oli ensimmäisiä muotoiluja siitä, miten resurssien allokointi tutkimustyöhön on mahdollista mallintaa mikroteoreettisin perustein. Malli käynnisti jo kolme vuosikymmentä jatkuneen akateemisen keskustelun endogeenisestä kasvusta, ja se on kenties tärkein niin sanotuista ensimmäisen sukupolven endogeenisista malleista. Kasvu

taloudessa syntyy horisontaalisesti innovaatioiden kasvattaessa talouden tuotevariaatioiden lukumäärää. Muita ensimmäisen sukupolven malleja ovat Helpmanin (1991) ja Aghion & Howittin (1992) mallit, joissa kehitys tapahtuu Romerin (1990) mallista poiketen vertikaalisesti tuotteiden laadun parannuksina.

Ensimmäisen sukupolven endogeenisten mallien läpimurto liittyi mallin mikroteoriaan pohjautuvaan muotoiluun, joka eri mallien eroista huolimatta perustuu yhteiselle ajatukselle: vaikka teknologinen tieto ei ole kilpailullista, tulee sen olla ainakin osittain poissulkevaa, jotta yksityiset yritykset allokoisivat resurssejaan tutkimustyöhön voittojensa maksimoimiseksi. Kilpailu on siis epätäydellistä, koska jos panoksille maksettaisiin niiden rajatuottavuuden mukaan, tuottaisivat yritykset tappiota. Tämä epätäydellisyys saadaan mallissa aikaan patenttien luomalla monopoliasemalla.

Romerin (1990) mallin mikroteoreettiset perusteet on seuraavissa alaluvuissa esitelty kokonaisuudessaan, jotta osoitetaan endogeenisten kasvumallien mikroteoriaan perustuvan tasapainon olemassaolo. Myöhempien mallisukupolvien kohdalla mikroteoreettisia perusteita ei ole samankaltaisuudesta johtuen erikseen esitelty, vaikka yksityiskohdissa onkin hyvin monenlaisia variaatioita.

3.2.1 Mallin kuvaus

Romer sisällyttää malliinsa useita tärkeitä oletuksia. Ensimmäiseksi teknologisen kehityksen oletetaan mahdollistavan talouden pitkän aikavälin kasvun aivan kuten Solow'n (1956) uusklassisessa kasvumallissa. Toiseksi markkinoiden omien kannusteiden oletetaan vaikuttavan teknologian kehitykseen, eli kehitys syntyy voittoaan maksimoivien toimijoiden itse allokoimissa resursseja tutkimustyöhön. Kolmas oletus on, että jonkin uuden teknologian synnyttyä tätä osaamista voidaan käyttää uudelleen ilman lisäkustannusta, eli yksittäisen teknologian hinta liittyy ainoastaan sen kehittämiseen.

Romerin (1990) alkuperäisessä mallissa talouden tuotanto hyödyntää neljää eri panosta: pääomaa, työtä, henkistä pääomaa ja teknologiaa. Tässä alaluvussa malli on kuitenkin esitelty Romerin (2012, 123–134) myöhemmän muotoilun mukaisesti, ja tässä muotoilussa pääomapanokset on yksinkertaisuuden vuoksi jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Käy kuitenkin ilmi, ettei tällä ole merkittävää vaikutusta analyysin johtopäätösten kannalta.

Oletetaan, että on olemassa ääretön määrä erilaisia välituotteita, ja jokainen uusi löydetty idea mahdollistaa uudenlaisen välituotteen käytön. Nämä välituotteet voidaan ajatella havainnollistamisen vuoksi esimerkiksi erilaisiksi kemiallisiksi yhdisteiksi, ja

jokainen uusi idea mahdollistaa uudenlaisen kemiallisen yhdisteen tuotannon ja käytön. Näitä yhdisteitä käytetään talouden lopputuotannon panoksina. Jokainen uusi idea kasvattaa tuottavuutta, eli käyttämällä monenlaisia erilaisia kemiallisia yhdisteitä saadaan aikaan enemmän lopputuotantoa kuin samalla määrällä yhtä ainoaa yhdistettä.

Kunakin ajanhetkenä on käytettävissä tietty lukumäärä $A > 0$ erilaisia ideoita. Jokaista työn yksikköä kohden voidaan tuottaa yksi yksikkö talouden jotakin välituotetta, eli $L(i)$ kuvaa sekä välituotteen i tuottamiseen käytettyä työn määrää että välituotteen tuotettua määrää. Lisäksi oletetaan, että koko talouden työpanos L_Y on jakautunut tasan eri välituotteiden tuotannon suhteen, eli $L(i) = L_Y/A$ kaikille i . Käyttäen Ethierin (1982) ehdottamaa tuotantofunktiota voidaan lopputuotanto Y ilmaista seuraavalla tavalla:

$$Y = \left[\int_{i=0}^A L(i)^\phi di \right]^{1/\phi} = \left[A \left(\frac{L_Y}{A} \right)^\phi \right]^{1/\phi} = A^{(1-\phi)/\phi} L_Y, \quad 0 < \phi < 1. \quad (3.1)$$

Nyt työllä on vakioiset skaalatuotot, ja tuotanto on kasvava funktio teknologian suhteen.

Yritysten oletetaan kehittävän uusia ideoita ja tuottavan näiden ideoiden pohjalta uusia välituotteita palkkaamalla kilpailullisilta työmarkkinoilta työvoimaa. Kehittäjäyritys perii hinnan $p(i)$ myydessään välituotteen i lopputuotantoa tuottaville yrityksille, koska saa ideaansa ikuisen patenttioikeuden. Välituotteiden tuotanto on patenteista johtuen siis monopolistista.

Lopputuotantoa tuottavat yritykset toimivat kuitenkin täydellisen kilpailun alaisuudessa. Lopputuotantosektorilla yritykset pyrkivät minimoimaan yhden lopputuotannon yksikön tuottamisen kustannukset, joten edustavan yrityksen minimointiongelman Lagrangen funktio saa muodon:

$$\mathcal{L} = \int_{i=0}^A p(i)L(i)di - \lambda \left(\left[\int_{i=0}^A L(i)^\phi di \right]^{1/\phi} - 1 \right). \quad (3.2)$$

Yrityksen tulee valita kaikille i :n arvoille 0:sta A :han kustannukset minimoiva määrä $L(i)$. Ensimmäisen kertaluvun ehdoksi saadaan $p(i) = \lambda L(i)^{\phi-1}$, ja tästä puolestaan voidaan johtaa edustavan yrityksen välituotteiden kysyntäfunktio:

$$L(i) = \left[\frac{\lambda}{p(i)} \right]^{1/(1-\phi)}. \quad (3.3)$$

Kysyntä on siis välituotteen hinnan suhteen laskeva, ja ϕ :n arvo vaikuttaa kysynnän hintajoustoon. Koska lopputuotantoa tuottavilla yrityksillä jokaisen välituotteen kustannukset ovat kiinteät ja tuotantofunktiolla on vakioiset skaalatuotot, vastaa rajakustannus keskimääräistä kustannusta, mikä puolestaan johtaa nollavoittoihin lopputuotesektorilla.

Talouden koko työvoima L on allokoitunut kahdelle sektorille: ajanhetkellä t työskentelee tutkimussektorilla määrä $L_A(t)$ ja hyödykkeiden tuotantosektorilla määrä $L_Y(t) = \int_{i=0}^A L(i, t) di$, eli $L = L_A(t) + L_Y(t)$. Työvoima oletetaan vakioksi, eli väestönkasvua ei mallissa ole. Tämä osoittautuu myöhemmin tärkeäksi oletukseksi.

Uusien ideoiden $\dot{A}(t)$ oletetaan syntyvän tutkimussektorilla melko deterministisellä tavalla.¹ Uudet ideat riippuvat lineaarisesti tutkimustyöpanoksen määrästä, ja ovat suoraan verrannolliset olemassa olevien ideoiden tai tiedon määrään:

$$\dot{A}(t) = \delta L_A(t) A(t), \quad \delta > 0. \quad (3.4)$$

Vakiomäärä tutkimukseen käytettyä työvoimaa tuottaa siis vakioisen ideoiden kasvuasteen: $\dot{A}(t)/A(t) = \delta L_A(t)$. Tämä voidaan perustella käytännössä esimerkiksi niin, että insinööri 2000-luvulla tuottaa paljon enemmän ja kehittyneempiä ideoita kuin insinööri sata vuotta sitten, koska kaikki viimeisin olemassa oleva tieto ja teknologia on insinöörin käytettävissä. Esimerkiksi algebran kehitys on varmasti nostanut myöhempien tutkijoiden tuottavuutta. Näin ideoiden kasvu on eksponentiaalista.

Jos työvoiman koko on vakio, on kasvuaste sitä suurempi, mitä suurempi osuus työvoimasta on allokoitu tutkimussektorille, Kuten aiemmin mainittua, yhtälöä 3.4 voidaan kutsua esimerkiksi meta-tuotantofunktioksi. Myöhemmin käy ilmi, että sen lineaarisuuden tarkastelu osoittautuu tärkeäksi endogeenisten mallien johtopäätösten kannalta.

Tutkimussektorille on yrityksillä vapaa pääsy. Jokainen yritys voi tuottaa uuden idean palkkaamalla työvoimaa vallitsevalla palkkatasolla $w(t)$. Meta-tuotantofunktion

¹ Oheisen tarkastelun parametrille δ voidaan antaa jonkinlaiset mikroperusteet tulkitsemalla se esimerkiksi Poisson-prosessin intensiteetiksi.

pohjalta yhden idean tuottamiseen vaadittu työn määrä on $1/[\delta A(t)]$. Tutkimussektorilla uudet ideat lisäävät tutkimuksen tuottavuutta, koska kaikki olemassa oleva tieto on tutkijoiden vapaasti käytettävissä. Tällä sektorilla ideoiden tuottajille ja patenttoijille ei erikseen makseta korvausta uuden tiedon käytöstä. Sen sijaan välituotesektorilla patenttien omistajat valitsevat patentoituihinsa ideoihin liittyvien välituotteiden tuotetun määrän ja hinnan, kun taas palkkataso, muiden välituotteiden hinnat ja hyödykkeiden tuotantosektorin työvoiman koko ovat yrityksen näkökulmasta annettuja.

Oletetaan, että idea i on tuotettu ajanhetkellä t , ja $\pi(i, \tau)$ kuvaa idean kehittäneen yrityksen voittoja ajanhetkellä τ . Tutkimussektorilla täytyy idean tuottamiseen liittyvän kustannuksen vastata siitä saatavien voittojen nykyarvoa korkotasolla r , joten ehto voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\int_{\tau=t}^{\infty} e^{-r(\tau-t)} \pi(i, \tau) d\tau = \frac{w(t)}{\delta A(t)}. \quad (3.5)$$

Talouden kuluttajien oletetaan mallissa tavanomaiseen tapaan maksimoivan äärettömän elinkaaren yli diskontattua hyötyään. Hyötyfunktio oletetaan logaritmiseksi kulutuksen $C(t)$ suhteen, joten intertemporaalinen hyöty saa seuraavan muodon:

$$U = \int_{t=0}^{\infty} e^{-\rho t} \ln C(t) dt, \quad \rho > 0. \quad (3.6)$$

Kaikkien kuluttajien oletetaan lisäksi omaavan samankokoinen alkuvarallisuus $X(0)$. Koko elinkaaren kulutuksen nykyarvo ei voi ylittää alkuvarallisuuden ja palkkatulojen $w(t)$ nykyarvon summaa, joten koron ollessa kiinteä on kuluttajien intertemporaalinen budjettirajoite muotoa:

$$\int_{t=0}^{\infty} e^{-rt} \ln C(t) dt \leq X(0) + \int_{t=0}^{\infty} e^{-rt} \ln w(t) dt. \quad (3.7)$$

Työmarkkinoiden kilpailullisuuden vuoksi oletetaan palkkatason olevan sama sekä hyödyke- että tutkimussektorilla. Lisäksi lopputuotanto voidaan vain kuluttaa, ja ainoat omaisuususerät taloudessa ovat patentit. Alkuvarallisuus vastaa siis jo kehitetyistä ideoista

saatavien voittojen nykyarvoa. Lopuksi voidaan vielä todeta, että identtisten kuluttajien tapauksessa hyödykemarkkinoiden tasapaino edellyttää, että $C(t)L = Y(t)$.

3.2.2 Mallin yleinen tasapaino

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan mallin yleisen tasapainon ratkaisemista Romerin (2012, 128–139) muotoilun pohjalta.

Tarkastellaan ensin uuden idean kehittäjän hinnoitteluongelmaa patentilleen. Mikrotalousteorian pohjalta monopolistisen yrityksen voiton maksimoiva hinta tuotteelleen on rajakustannuksen ja $\eta/(\eta - 1)$:n tulo, missä η on kysynnän hintajousto. Koska välituotteet voidaan tuottaa yhden suhteessa yhteen työn kanssa, vastaa rajakustannus palkkaa, ja lisäksi välituotteiden kysynnän hintajousto on yhtälön 3.3 pohjalta $1/(1 - \phi)$. Idean kehittäjän määrittämä hinta patentilleen on siis $w(t) * [1/(1 - \phi)]/[1/(1 - \phi)] - 1 = w(t)/\phi$.

Seuraavaksi selvitetään ideoiden kehittäjien voittojen kasvuaste, joka on tärkeä kannuste innovoinnin kannalta. Kaikkien välituotteiden hinnat ovat samat, joten kaikkia tuotetaan sama määrä, eli $[L - L_A(t)]/A(t)$. Tämän johdosta myös ideoita kehittäneiden yritysten voitot ovat identtiset. Tasapainossa voidaan myös olettaa työn osuuksien eri sektoreilla olevan vakiot, joten aikaindeksi voidaan hyvin pudottaa pois muuttujasta L_A . Nyt tuotetun määrän ja asetetun hinnan pohjalta voidaan laskea uuden idean kehittäneen yrityksen voitot:

$$\pi(t) = \frac{L - L_A}{A(t)} \left[\frac{w(t)}{\phi} - w(t) \right] = \frac{1 - \phi}{\phi} \frac{L - L_A}{A(t)} w(t). \quad (3.8)$$

Koska talouden lopputuotannon määrittää yhtälö $Y(t) = A(t)^{(1-\phi)/\phi} L_Y(t)$, ja koska tässä L_Y :n voidaan olettaa olevan vakio, määrittää henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuasteen termin $A(t)^{(1-\phi)/\phi}$ kasvuaste, joka on $[(1 - \phi)/\phi]\delta L_A$. Mallin oletusten pohjalta myös kulutuksen ja palkkojen kasvuvauhti vastaa tasapainossa tätä samaa kasvuastetta.

Koska työn osuudet eri sektoreilla ovat vakiot, palkkojen kasvuaste on $[(1 - \phi)/\phi]\delta L_A$ ja $A(t)$:n kasvuaste on δL_A , voidaan myös ylempanä lasketun voittofunktion 3.8 kasvuaste laskea. Tämä kasvuaste on $[(1 - \phi)/\phi]\delta L_A - \delta L_A = [(1 - 2\phi)/\phi]\delta L_A$.

Seuraavaksi tarkastellaan talouden reaalista korkotasoa. Kun kuluttajien riskiaversio on kiinteä, voidaan kulutuksen kasvu laskea yhtälöllä $\dot{C}(t)/C(t) = [r(t) - \rho]/\theta$, missä θ kuvaa suhteellista riskiaversiota (Romer 2012, 51–57). Logaritmissen hyödyn tapauksessa tämä parametri saa arvon $\theta = 1$, minkä pohjalta mallin korkotaso on:

$$r(t) = \rho + \frac{\dot{C}(t)}{C(t)} = \rho + \frac{1 - \phi}{\phi} \delta L_A. \quad (3.9)$$

Eri sektorien työn vakio-osuuksien pohjalta tämä korkotaso on vakio, kuten aiemmin mallissa oletettiin.

Korkotason ja voittojen kasvuasteen avulla voidaan ideoita kehittävien yritysten voittojen nykyarvo selvittää. Ajanhetkellä t kehitetyn idean nykyarvo on:

$$\pi(t) = \frac{\frac{1 - \phi}{\phi} \frac{L - L_A}{A(t)} w(t)}{\rho + \frac{1 - \phi}{\phi} \delta L_A - \frac{1 - 2\phi}{\phi} \delta L_A} = \frac{1 - \phi}{\phi} \frac{L - L_A}{\rho + \delta L_A} \frac{w(t)}{A(t)}. \quad (3.10)$$

Seuraavaksi tutkimussektorille allokoitun työvoiman määrä tasapainossa voidaan selvittää. Yritysten sijoittaessa aidosti positiivinen määrä resursseja tutkimukseen täytyy tasapainossa idean kehittämisen nykyarvon vastata sen kustannusta, joka on $w(t)/\delta A(t)$. Työvoiman määrä tutkimussektorilla voidaan siis selvittää ehdosta

$$\frac{1 - \phi}{\phi} \frac{L - L_A}{\rho + \delta L_A} \frac{w(t)}{A(t)} = \frac{w(t)}{\delta A(t)}. \quad (3.11)$$

Tästä voidaan ratkaista, että tasapainossa pätee

$$L_A = (1 - \phi)L - \frac{\phi\rho}{\delta}. \quad (3.12)$$

Tämä osuus on selvästi myös vakio, kuten tarkastelussa on oletettukin. Tämän yhtälön pohjalta L_A voi saada itse asiassa myös negatiivisen arvon, mikä tarkoittaa, ettei yhdenkään innovaation tuottaminen ole kannattavaa. Oletamme kuitenkin, että tällaisessa tapauksessa tutkimukseen allokoitu työmäärä on tasan 0.

Lopuksi voidaan L_A :n tasapainoarvon pohjalta laskea vielä talouden kokonaistuotannon kasvuaste, joka on samalla henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuaste:

$$\frac{\dot{Y}(t)}{Y(t)} = \max \left\{ \frac{(1-\phi)^2}{\phi} \delta L - (1-\phi)\rho, 0 \right\}. \quad (3.13)$$

3.2.3 Mallin tulkinta

Ylempänä esitetty Romerin (1990; 2012) kasvumalli antaa vahvan mikroteoreettisen pohjan teknologian kehitykseen pohjautuvalle talouden kasvuille. Tämä teknologian kehitys on seurausta voittoaan maksimoivien yritysten tietoisista päätöksistä allokoida resursseja T&K-toimintaan, joka tuottaa uusia ideoita. Uudet ideat luovat horisontaalista kasvua, eli välituotevariaatioiden määrä kasvaa.

Talouden yleisessä tasapainossa tuotannon ja työn tuottavuuden kasvuaste riippuu tutkimukseen allokoidun työvoiman määrästä. Jos tuotanto- ja tutkimussektoreiden työvoimaosuudet ovat vakiot, on kasvuaste positiivisessa yhteydessä työvoiman kokoon, eli taloudessa on aiemmin mainittuja skaalavaikutuksia. Mallin skaalavaikutuksista johtuen Romer (1990) olettaa väestön tason olevan vakio, jotta ”räjähtävältä” kasvulta vältytään.

Lisäksi kuluttajien ollessa kärsimättömämpiä, eli ρ :n ollessa suurempi, pienenee kasvuaste, koska tutkimukseen investoidaan vähemmän. Myös parametrin ϕ kasvu laskee kasvuastetta, koska se tekee panoksista vahvemmin toistensa substituuotteja, mikä heikentää patenttoijien markkinavoimaa ja tekee tutkimuksesta vähemmän houkuttelevaa. Tutkimuksen tuottavuutta kuvaavan parametrin δ kasvu puolestaan lisää tutkimuksen kannusteita ja kasvattaa talouden kasvuastetta.

Koska mallissa ei vallitse täydellinen kilpailu, ei kuluttajan elinkaarihyödyn avulla määritetty sosiaalinen optimi toteudu. Maksimoimalla hyötyä tutkimuksen työvoiman suhteen voidaan osoittaa, että tutkimuksen määrän tasapainotaso on sosiaalista optimia matalammalla, ja tämän optimitason erotus tasapainotasoon riippuu välituotteiden välistä substituuutiota kuvaavasta parametrista ϕ (Romer 2012, 131–132). Mallissa esiintyvät myös jo aiemmin luvussa 2.1 mainitut tutkimuksen ulkoisvaikutukset. Koska tasapainotaso on sosiaalista optimia matalammalla, voidaan kasvuasteisiin ja hyvinvointiin vaikuttaa erilaisilla julkisilla T&K-tuilla.

Romerin alkuperäisissä muotoiluissa myös fyysinen pääoma on tarkastelussa mukana. Uudet ideat ilmenevät uusina pääomahyödykkeinä, jotka ovat panos tuotantofunktiossa työn ohella. Tämä mahdollistaa kulutuksen ja investointien väliseen suhteeseen vaikuttavien tekijöiden tarkastelun, mutta mallin keskeisien johtopäätöksiä kannalta sillä ei ole merkitystä. Jos fyysinen pääoma ei ole meta-tuotantofunktion panos, on fyysisillä investoinneilla vaikutuksia ainoastaan tuotannon tasoon, mutta ei kasvuasteeseen. Fyysisen pääoman ollessa osa myös meta-tuotantofunktiota monimutkaistuu analyysi huomattavasti, ja fyysisillä investoinneilla on tällöin vaikutuksia myös kasvuasteisiin. (Romer 2012, 133.)

3.3 Semi-endogeeniset kasvumallit

Ensimmäisen sukupolven endogeenisten mallien suurin ongelma liittyy niiden skaalavaikutuksiin, joiden johdosta väestönkasvu pyrittiin rajaamaan ulos tarkastelusta. Jones (1995a; 1995b) kritisoi vahvasti tätä rajoitetta ja loi oman muotoilunsa suoraan Romerin (1990) mallin pohjalle. Tässä muotoilussa teknologian skaalavaikutus on karsittu pois, sillä innovointi vaikeutuu teknologian sofistikoituessa, ja tutkimussektorilla syntyneet uudet ideat ovat osin päällekkäisiä. Tämä rajaa pois mallista räjähtävän kasvun mahdollisuuden. Muita samankaltaisia semi-endogeenisen kasvun malleja ovat esimerkiksi Kortum (1997) ja Segerstrom (1998).

Semi-endogeenisten mallien keskeinen ajatus voidaan ilmaista Jonesin (1995a) uudelleen muotoileman meta-tuotantofunktion avulla. Mallikehikko on muuten samanlainen kuin Romerilla (1990; 2012), mutta meta-tuotantofunktio saa uudenlaisen muodon:

$$\dot{A}(t) = \delta L_A(t)^\gamma A(t)^\theta, \quad 0 < \gamma \leq 1.^2 \quad (3.14)$$

Nyt termin $A(t)^\theta$ potenssin arvon tarkastelu on tärkeää. Kun $\theta < 0$, vaikeutuu ideoiden luominen teknologian kehittyessä ja sofistikoituessa. Kun $\theta = 0$, ei uusien innovaatioiden syntyminen riipu teknologian tasosta. Kun taas $\theta > 0$, ilmaantuu uusia ideoita sitä enemmän mitä korkeampi on teknologian taso. Parametri θ kuvaa siis itse

² Yksinkertaisuuden vuoksi myös tässä ja myöhempien mallien yhteydessä pääoman rooli meta-tuotantofunktion ja talouden tasapainon kannalta sivuutetaan, koska sen merkitys on vähäinen.

asiassa osaa tutkimustoiminnan ulkoisvaikutuksista, eli aiemmin mainittua T&K-vaikutusta ja tiedon läikkymistä. On kuitenkin huomattava, että teknologian eksponentiaalisen kasvun vaikeutumiseen riittää, että $\theta < 1$.

Termin $L_A(t)^\gamma$ potenssi puolestaan pitää sisällään innovaatioiden päällekkäisyyksistä aiheutuvan ulkoisvaikutuksen. Tätä ilmiötä ovat esimerkiksi Sequeira & Neves (2020) luonnehtineet ”varpaille astumiseksi” (engl. stepping-on-toes effect). Päällekkäinen tutkimus ja innovointi vähentää meta-tuotantofunktion ”todellista” tutkimuspanosta. Toisaalta tilanteen $\gamma < 1$ voidaan myös ajatella kuvaavan tilannetta, jossa tutkimuksen kasvu liittyy taidoiltaan heikompien tutkijoiden palkkaamiseen. Kremer (1993) spekuloi myös, että parametrin arvo voisi olla jopa yli yhden erilaisten tutkijoiden verkostoitumisvaikutusten seurauksena. Kun $\theta = 1$ ja $\gamma = 1$, vastaa meta-tuotantofunktio ensimmäisen sukupolven mallien muotoilua.

Jonesin (1995a) malli olettaa Romerin (1990; 2012) mallin tapaan henkeä kohden lasketun kokonaistuotannon kasvun riippuvan tasapainoisella kasvu-uralla teknologian A kasvuasteesta. Teknologian kasvuaste voidaan johtaa meta-tuotantofunktion avulla seuraavasti:

$$\frac{\dot{A}(t)}{A(t)} = \delta \frac{L_A(t)^\gamma}{A(t)^{1-\theta}}. \quad (3.15)$$

Tasapainoisella kasvu-uralla teknologian kasvuaste määritelmällisesti on vakio, joten tasapainoinen kasvu edellyttää, että termit $L_A(t)^\gamma$ ja $A(t)^{1-\theta}$ kasvavat samaa vauhtia. Tämä edellyttää selvästikin teknologian kehittyessä tutkimuspanoksen jatkuvaa kasvua, jonka mahdollistaa väestönkasvu, jos sektorien työvoimaosuudet ovat vakiot.

Olettamalla $\dot{A}(t)/A(t)$ vakioksi ja differentioimalla yhtälö 3.15 molemmin puolin ajan suhteen saadaan laskettua tasapainoisen kasvu-uran teknologian kasvuaste $\dot{A}(t)/A(t) \equiv g_A$ eksplisiittisesti:

$$g_A = \frac{\gamma n}{1 - \theta}. \quad (3.16)$$

Tässä n kuvaa tutkimussektorin työvoiman kasvuastetta, joka vastaa tasapainoisella kasvu-uralla väestönkasvua. Huomataan, että väestön kasvaessa ei tasapainoista kasvu-uraa ensimmäisen sukupolven malleissa selvästikään ole olemassa, sillä $\theta = 1$, ja

kasvuaste kasvaa äärettömäksi. Kun $\theta < 1$, ei skaalavaikutusten aiheuttamaa räjähtävää kasvua pääse syntymään. Teknologian kasvuaste riippuu lineaarisesti väestönkasvusta, eikä väestön koosta. Näin teknologian kasvu saa kytköksensä tässäkin väestön kasvuasteeseen: uudet ideat vaativat ihmisiä. Semi-endogeenisten mallien kuvaavaa kasvun yhteyttä väestönkasvuun onkin sanottu heikoksi skaalavaikutukseksi.

Yksinkertaisena havainnollistavana esimerkkinä voidaan tarkastella tapausta $\theta = 0$ ja $\gamma = 1$. Nyt $\dot{A}(t) = \delta L_A(t)$, joten vakiomäärä tutkimusta tuottaa vakiomäärän uusia ideoita.³ Teknologian kehittyessä uudet ideat muodostavat kuitenkin prosentuaalisesti yhä pienemmän osuuden kaikesta tiedosta, joten teknologian kasvuaste lähestyy ajan kuluessa nollaa. Tämän kasvun hidastumisen voi kuitenkin estää väestönkasvu, jos vakio-osuus väestöstä on allokoitunut tutkimussektorille.

Yllättävä johtopäätös kuitenkin on, että vaikka mikroteoreettisesti malli pohjautuu endogeeniseen T&K-toimintaan aiemmin esitellyn Romerin (1990; 2012) mallin tapaan, määrittää pitkän aikavälin kasvuasteen ainoastaan väestön kasvuaste, joka usein oletetaan eksogeeniseksi muuttujaksi. Juuri tästä juontaa juurensa mallien kutsuminen semi-endogeenisiksi. Erilaisilla T&K-tuilla ei voida vaikuttaa pitkän aikavälin kasvuun, koska sosiaalisesti optimaalinen kasvuaste on mallissa sama kuin tasapainossa.

Tutkimussektorin osuus kaikesta työvoimasta saattaa kuitenkin poiketa sosiaalisesta optimista. Ensinnäkin Romerin (1990; 2012) mallin tapaan kilpailu ei ole täydellistä vaan monopolistista, mikä alentaa tutkimuksen tasapainotasoa. Toiseksi myös tutkimuksen ulkoisvaikutuksia kuvaavat parametrit θ ja γ määrittävät, onko tutkimuksen tasapainotaso optimaalista matalammalla vai korkeammalla, eli ovatko ulkoisvaikutukset kokonaisuudessaan positiivisia vai negatiivisia. Kun $\theta < 0$ tai $\gamma < 1$, voi tutkimusta olla jopa optimaalista enemmän. Erilaisilla T&K-tuilla tai -veroilla voidaan mallissa vaikuttaa tutkimussektorin työvoimaosuuteen tavoiteltaessa sosiaalista optimia.

Pysyvällä tutkimuksen määrän kasvattamisella ei mallissa ole vaikutusta kasvuasteisiin, mutta sillä on vaikutus tuotannon tasoon. Tuotannolla on erilaisia muutosuria, jotka ovat seurausta T&K-panostusten kasvusta. Nämä muutosurat ovat hyvin pitkiä, ja parametrin θ ollessa mielivaltaisen lähellä yhtä kasvaa muutosuran pituus äärettömyyteen. Siten pitkän aikavälin kasvuasteiden ja T&K-tukien

³ Tästä idean määritelmästä poiketen esimerkiksi Kortum (1997), Segerstrom (1998) ja Bloom ym. (2020) määrittelevät malleissaan idean tietynsuuruiseksi *suhteelliseksi* parannukseksi. Jos idea määritelläänkin näin, vaikeutuu uusien ideoiden löytyminen silloin, kun $\theta < 1$.

riippumattomuudesta huolimatta T&K-panostuksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia tuotannon ja tuottavuuden kasvuun tarkasteltaessa järkevästi rajattuja aikavälejä.

3.4 Schumpeterilaiset endogeeniset kasvumallit

Niin kutsutut schumpeterilaiset mallit kuvaavat talouden kasvua kuuluisan luovan tuhon (Schumpeter 1942) käsitteen avulla. Käsitteen ajatus on, että talouden vanhat tuotteet ja alat häviävät uusien tieltä, kun uudet yritykset kykenevät yhä tehokkaampaan ja laadukkaampaan tuotantoon. Tämä johtaa talouden resurssien yhä parempaan käyttöön, ja tuottavuus kasvaa. Endogeenisten kasvumallien kontekstissa schumpeterilaisilla malleilla viitataan vertikaaliseen ja horisontaalisen teknologian kehityksen yhdistelmään: olemassa olevista tuotteista tehdään yhä laadukkaampia, ja samaan aikaan myös talouden hyödykevariaatioiden määrä kasvaa. Kasvu on puhtaan endogeenista alakohtaisesti, mutta tutkimuspanoksen jakaantuminen yhä useammalle yritykselle rajoittaa räjähtävää kasvua. Tällöin semi-endogeenisista malleista poiketen voidaan malleissa säilyttää edelleen johtopäätös, jonka mukaan tutkimuspanostuksilla on vaikutus pitkän aikavälin kasvuasteisiin. Tästä johtuen schumpeterilaisia malleja on kutsuttu myös toisen sukupolven täysin endogeenisiksi malleiksi. Schumpeterilaisia endogeenisiä malleja ovat kehittäneet muun muassa Dinopoulos & Thompson (1998), Peretto (1998), Young (1998) ja Howitt (1999).

Schumpeterilaiset endogeeniset mallit rakentuvat jälleen hyvin samankaltaiselle pohjalle kuin aiemmin esitelty Romerin (1990; 2012) malli. Vaikka mikroteoreettisten perusteiden yksityiskohdissa on paljon eroja, perustuu muotoilu voittoaan maksimoivien yritysten tietoisiin päätöksiin allokoida resursseja tutkimustoimintaan. Laincz & Peretto (2006) sekä Bond-Smith (2019) tiivistävät schumpeterilaisten endogeenisten mallien keskeisimmän ajatuksen seuraavasti. Olkoon nyt monopolistisen yrityksen i tuotantofunktio

$$Y_i(t) = A_i(t)^\sigma L_{Yi}(t), \quad (3.17)$$

missä $L_{Yi}(t)$ kuvaa yrityksen lopputuotantoon käytettyä työvoimaa, ja $A_i(t)$ yrityksen teknologiaa. Tämä teknologia ilmenee yrityksen tuottaman hyödykkeen laadun parantumisena. Koko talouden tuotantoa $Y(t)$ kuvaa puolestaan

$$Y(t) = \left[\int_{i=0}^{F(t)} Y_i(t)^{\frac{1}{\phi}} di \right]^{\phi}, \quad \phi > 1, \quad (3.18)$$

missä $F(t) = \eta L(t)$ kuvaa erilaisten lopputuotevariaatioiden lukumäärää, ja η on vakio. Tämä variaatioiden lukumäärä kasvaa siis markkinoiden tasapainossa kiinteässä suhteessa väestön kanssa. Tämä kiinteä suhde ei ole kuitenkaan mallin oletus sinänsä, vaan on seurausta mallin yleisestä tasapainosta (Peretto 2016). Parametri ϕ puolestaan mallissa kuvaa hyödykevariaatioiden välistä substituuutiota. Koko talouden tuotantofunktio on hyvin lähellä Romerin (1990) mallin tuotantofunktiota.

Schumpeterilaisissa malleissa meta-tuotantofunktion määrittely on tärkeää nimenomaan yrityksen tasolla. Yrityksen i teknologia kehittyy nyt seuraavan yhtälön mukaan:

$$\dot{A}_i(t) = \delta L_{Ai}(t) A(t), \quad A(t) = \int_{i=0}^{F(t)} \frac{A_j(t)}{F(t)} dj, \quad (3.19)$$

missä $L_{Ai}(t)$ kuvaa yrityksen i T&K-työvoimaa ja $A(t)$ kuvaa eräänlaista yleistä koko talouden tiedon tasoa tai keskimääräistä teknologiaa, johon jokainen yksittäinen yritys kontribuoi. Tämän teknologian läikkymistapa vaihtelee mallista toiseen: läikkyminen voi riippua kaikkien yritysten keskimääräisestä teknologian tasosta kuten yllä (Peretto 1998; Dinopoulos & Thompson 1998), se voi olla puhtaan yrityskohtaista (Peretto 1999), tai riippua teknologiarintaman kärjessä sijaitsevien yritysten teknologian tasosta (Young 1998; Howitt 1999).

Lisäksi malleissa työmarkkinoiden tasapaino edellyttää, että

$$\int_{i=0}^{F(t)} [L_{Yi}(t) + L_{Ai}(t)] di = L(t). \quad (3.20)$$

Analyysin kannalta on havainnollistavaa esittää talouden tasapaino symmetrisessä tasapainossa, eli yritysten keskimääräisen työvoiman ja teknologian avulla. Näin ollen $L_Y(t)$ ja $L_A(t)$ kuvaavat nyt yritysten keskimääräistä työvoimaa. Kokonaistuotanto voidaan siten esittää muodossa

$$Y(t) = F(t)^{\phi} A(t)^{\sigma} L_Y(t), \quad (3.21)$$

missä tuotannon kasvu voi selvästi syntyä hyödykevariaatioiden kasvusta, teknologian, eli hyödykevariaatioiden keskimääräisen laadun paranemisesta, tai yritysten keskimääräisen koon kasvusta. Yritysten keskimääräinen teknologia kehittyy puolestaan yhtälön $\dot{A}(t) = \delta L_A(t)A(t)$ mukaan. Yrityksen tasolla meta-tuotantofunktio on sama kuin Romerin (1990) mallissa, eli skaalavaikutus pätee tällä tarkastelun tasolla.

Koska $L(t) = F(t)L_Y(t) + F(t)L_A(t)$, voidaan henkeä kohden laskettu tuotanto esittää muodossa

$$\frac{Y(t)}{L(t)} = y(t) = F(t)^{\phi-1} A(t)^{\sigma} (1-s), \quad (3.22)$$

missä s kuvaa tutkimussektorin työvoimaosuutta, ja joka on vakio tasapainoisella kasvu-uralla. Differentioimalla yhtälö ajan suhteen voidaan vielä laskea henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuaste:

$$\frac{\dot{y}(t)}{y(t)} \equiv g_y = (\phi - 1) \frac{\dot{F}(t)}{F(t)} + \sigma \frac{\dot{A}(t)}{A(t)} = (\phi - 1)n + \sigma \delta L_A(t). \quad (3.23)$$

Koska tiedetään, että $L_A(t) = sL(t)/F(t)$, ja että $F(t) = \eta L(t)$, voidaan tasapainoisen kasvu-uran henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuaste ilmaista myös muodossa:

$$g_y = (\phi - 1)n + \frac{\sigma \delta s}{\eta}. \quad (3.24)$$

Henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuaste riippuu siis keskimääräisestä hyödykekohtaisesta tutkimuspanoksen tasosta, tai toisin ilmaistuna tutkimussektorin työvoimaosuudesta s , jota voidaan kutsua myös tutkimusintensiteetiksi. Malli säilyttää täyden endogeenisuuden semi-endogeenisista malleista poiketen, koska kasvuaste ei edellytä jatkuvaa väestön ja tutkimuspanoksen kasvua. Osa kasvusta syntyy myös hyödykevariaatioiden määrän kasvusta, ja kuluttajien arvostusta variaatioiden määrän kasvua kohtaan kuvaa parametri ϕ . Jos $\phi = 1$, ovat kuluttajat indifferenttejä uusista variaatioista kohtaan, mutta malli säilyttää silti endogeenisen luonteensa.

Mallissa yrityskohtainen meta-tuotantofunktio on lineaarinen tutkimuspanoksen suhteen kuten ensimmäisen sukupolven malleissa, mutta väestönkasvun myötä syntyvä tuotevariaatioiden kasvu jakaa tutkimusresurssit yhä useamman monopolistisen yrityksen ja erilaisen teknologian välille. Tämä riittää neutraloimaan skaalavaikutukset ja räjähtävän kasvun, ja selittää omalla tavallaan, miksi talouden tutkimuspanostusten taso on kasvanut ilman tuottavuuden kasvuasteen merkittävää nousua. Hyvinvointia ja kasvua voidaan eri mallien spesifioinnista riippuen parantaa hyvin erilaisilla T&K-tuilla, ja täydestä endogeenisuudesta johtuen tuilla voi olla pysyviä vaikutuksia kasvuasteisiin. T&K-tukien tulee kuitenkin malleissa pääosin kohdistua vertikaaliseen tutkimukseen.

Endogeenista kasvua voidaan kuvata myös yhdistämällä elementtejä sekä semi-endogeenisista että schumpeterilaisista malleista Jonesin (1999) tapaan. Hyödykevariaatioiden ja työvoiman kiinteä suhde ei ole välttämätön ehto täysin endogeeniselle kasvuille, sillä hyödykevariaatioiden ja työvoiman suhde voidaan määritellä esimerkiksi yhtälöllä $F(t) = \eta L(t)^\beta$. Lisäksi yrityskohtaisella meta-tuotantofunktio voi olla semi-endogeenisten mallien kaltainen muoto $\dot{A}(t) = \delta L_A(t)^\gamma A(t)^\theta$. Seuraavassa oletetaan kuitenkin yksinkertaisuuden vuoksi, että $\gamma = 1$. Henkeä kohden lasketun tuotannon kasvuaste voidaan johtaa nyt seuraavaan muotoon:

$$g_y = (\phi - 1)\beta n + \frac{\sigma \delta s L(t)^{1-\beta}}{\eta A(t)^{1-\theta}}. \quad (3.25)$$

Yhtälö 3.25 yleistää itse asiassa kaikkien kolmen aiemman sukupolven mallit. Kun $\theta = 1$ ja hyödykevariaatioiden määrä on kiinteä tai kasvaa väestöä hitaammin ($0 \leq \beta < 1$), astuu skaalavaikutus voimaan ja kasvuaste riippuukin Romerin (1990) mallin tapaan väestön koosta. Jos taas hyödykevariaatioiden määrä kasvaa väestöä nopeammin ($\beta > 1$) ja $\theta = 1$, supistuu yhtälön 3.25 jälkimmäinen termi nolleen, ja henkeä kohden lasketun tuotannon kasvu riippuukin semi-endogeenisten mallien tapaan vain väestön kasvuasteesta. Hyödykevariaatioiden kasvuasteen suhde väestönkasvuun määrittää siis sen, neutraloivatko uudet hyödykevariaatiot skaalavaikutuksen. Kun taas pätee $\theta < 1$, supistuu yhtälön 3.25 jälkimmäinen termi aina nolleen, ja henkeä kohden lasketun tuotannon kasvu riippuu semi-endogeenisten mallien tapaan jälleen väestön kasvuasteesta. Tavanomainen schumpeterilainen kasvu pätee vain, kun $\theta = \beta = 1$. On

kuitenkin huomioitava, ettei oheinen Jonesin (1999) muotoilu pohjaudu mihinkään varsinaisiin mikroteoreettisiin perusteisiin tai yleiseen tasapainoon.

3.5 Neljännen sukupolven endogeeniset kasvumallit

Kolmen ensimmäisen sukupolven endogeenisiin kasvumalleihin liittyy erilaisia ”veitsenterällä” lepääviä oletuksia, jotka ovat kohdanneet kritiikkiä. Groviec (2007) on osoittanut, että tasapainoinen kasvu-ura endogeenisissa malleissa edellyttää vähintään yhtä lineaarista differentiaaliyhtälöä $\dot{X} = fX$, jossa X on jokin mallin muuttuja, ja f on jokin funktio, joka on riippumaton X :n suhteen. Ensimmäisen sukupolven malleissa ja schumpeterilaisissa malleissa X kuvaa teknologiaa, eli lineaarisuus liittyy näissä malleissa meta-tuotantofunktioon. Lisäksi schumpeterilaisissa malleissa on toinen lineaarisuusolettama, joka liittyy uusien hyödykevariaatioiden ja väestön väliseen yhteyteen. Semi-endogeenisissa malleissa X kuvaa puolestaan väestöstä. Kun kasvu on tarkasteltavassa mallissa X :n suhteen vähemmän kuin lineaarista, kasvu vaimenee, ja henkeä kohden laskettu tuotanto konvergoituu lopulta kohti vakiota. Jos taas kasvu X :n suhteen on enemmän kuin lineaarista, kasvaa henkeä kohden laskettu tuotanto äärettömyyteen äärellisessä ajassa. Tästä juontaa juurensa kritiikki mallien lineaarisuutta tai niin sanottua ”veitsenterää” kohtaan: tasapainoinen kasvu on mahdollista vain äärettömän kapealla parametrien arvojoukolla (Peretto 2018, 49–50).

Luontevin lineaarisuusolettama liittyy selvästi väestönkasvuun. Semi-endogeenisilla malleilla ei ole muita lineaarisuusrajoitteita, mutta niillä on aiemmin mainittu ja ei-toivottu ominaisuus, jonka mukaan pitkän aikavälin kasvu ei olekaan puhtaan endogeenista. Schumpeterilaiset mallit tarjoavat tässä mielessä houkuttelevimman vaihtoehdon, mutta niihin liittyy kaikkein eniten rajoittavia oletuksia. Yrityskohtaisen meta-tuotantofunktion lineaarisuuden lisäksi schumpeterilaiset mallit usein olettavat tuotevariaatioiden määrän riippuvan lineaarisesti väestöstä, vaikka tämä tarkalleen ottaen onkin seurausta vain yleisestä tasapainosta, eikä oletus itsessään (Peretto 2016). Tämän lisäksi mallit yleensä olettavat, ettei vertikaalisella ja horisontaalisella innovoinnilla ole ulkoisvaikutuksia toisiinsa, eli niiden välillä ei tapahdu tiedon läikkymistä. Tämän viimeisen oletuksen höllentäminen redusoi mallit usein itse asiassa semi-endogeenisiksi (Li 2000).

Schumpeterilaisten mallien oletuksia voidaan höllentää kuitenkin myös siten, että uusien hyödykevariaatioiden laadun parantaminen vaikeutuu (Howitt 1999), tai niin, että

vertikaalisen ja horisontaalisen innovoinnin välinen tiedon läikkyminen sallitaan (Peretto 1999). Alakohtainen meta-tuotantofunktion lineaarisuus kuitenkin säilyy, jotta kasvu malleissa pysyy puhtaan endogeenisena. Ennen kaikkea yrityskohtainen meta-tuotantofunktio ei saa olla enemmän kuin lineaarinen teknologian tason suhteen, koska tällöin Romerin (1990) mallin kaltainen skaalavaikutus astuu voimaan.

Bond-Smithin (2019) mukaan on mahdollista, että veitsenterällä lepäävistä oletuksista on vihdoinkin päästy eroon endogeenisten mallien teoriassa, sillä Peretton (2018) tuoreessa mallissa kaikista lineaarisuusolettamista on irrottauduttu. Tässä mallissa Groviejcin (2007) osoittama lineaarisuusvaatimus onkin ainoastaan kasvun tasapainon ominaisuus, eli lineaarisuus ilmenee ainoastaan talouden konvergoituessa tasapainouralleen. f on mallissa riippuvainen X :stä ja muista muuttujista, mutta tulee näistä riippumattomaksi tasapainossa markkinoiden toiminnan seurauksena. Bond-Smith (2019) kutsuukin mallia ensimmäiseksi neljännen sukupolven endogeeniseksi kasvumalliksi.

Mallin talouden lopputuotanto voidaan jokaisella periodilla kuluttaa, käyttää uusien välituotteiden valmistamiseen, olemassa olevien välituotteiden laatua parantavaan tutkimukseen tai uusia välituotevariaatioita luovaan tutkimukseen. Mikroteoreettinen perusta pohjautuu jälleen muiden endogeenisten mallien tapaiselle pohjalle. Olkoon A hyödykkeiden laatua kuvaava muuttuja, F hyödykevariaatioiden lukumäärä ja L työvoima. Nyt f kuvaa mallissa uusien hyödykevariaatioiden ja laadun parantumisen epälineaarista kehitystä, ja on määritelty seuraavasti:

$$f \equiv \frac{A^{\theta-1}L}{F^{1-\sigma}}, \quad \theta \geq 1, \sigma < 1. \quad (3.26)$$

Kun $X = F$, määrittelee yhtälö variaatioiden epälineaarisen kasvun, joka on ensinnäkin seurausta väestönkasvusta, mutta toisaalta myös hyödykkeiden laadun kasvusta, joka luo kannusteita tulla markkinoille. Tämä poikkeaa aiemmista sukupolvista, joissa variaatioiden määrä riippuu vain jostakin varannosta, kuten väestöstä. Kun taas $X = A$, kuvaa yhtälö laadun epälineaarista parantumista, joka ensinnäkin on seurausta väestönkasvusta, mutta jota toisaalta rajoittaa F :n myötä pienenevä markkinaosuus. Tämä on myös aiempien schumpeterilaisten mallien keskeinen ajatus.

Peretton (2018) mallissa talous pystyy konvergoitumaan tasapainoiselle ja täysin endogeeniselle kasvu-uralle rajoittaen parametrien arvoja huomattavasti vähemmän. Itse

asiassa malli on yhtälön 3.25 tapaan kaikkien aiempien sukupolvien mallien yleistys. Kun $\theta = 1$, vastaa malli tavallista schumpeterilaista mallia. Kun $\theta < 1$, on eksponentiaalisten laadunparannusten aikaansaaminen yhä haastavampaa, ja malli redusoituu semi-endogeeniseksi, koska kaikki kasvu on lopulta väestönkasvun myötä syntyvän variaatioiden kasvun seurausta. Toisaalta kasvu on mallissa semi-endogeenista myös silloin, jos on kannattavampaa investoida uusien variaatioiden luomiseen kuin laadun parantamiseen. Kun taas $\theta > 1$, on laadun kehittäminen yhä helpompaa, mutta räjähtävää kasvua ei silti tapahdu. Tämä on mallin ominaispiirre vanhempiin sukupolviin nähden, sillä tasapainoinen, täysin endogeeninen kasvu on mahdollista laajalla parametrien arvojoukolla. Mallissa ei siis ole yhtäkään ”veitsenterän” muotoista rajoitetta. Romerin (1990) mallin kaltainen skaalavaikutus astuu mallissa peliin ainoastaan, jos markkinoille tuleminen on erityisen houkuttelevaa, eli jos $\sigma \geq 1$.

4 ENDOGEENISTEN MALLIEN EMPIIRISET SOVELLUKSET

Talouden kasvuteorian suurimmat kysymykset ovat pitkään liittyneet siihen, mikä selittää pitkän aikavälin elintason kasvua ja sen huomattavia eroja maiden välillä. Endogeenisten kasvumallien suuri kontribuutio on ollut kuvata kasvua tiedon ja teknologian avulla tapahtuvana tuotannon tehostumisena, ja teknologinen kehitys on malleissa ennen kaikkea markkinoiden kannusteiden synnyttämä prosessi. Mallien kelvollisuus selviää kuitenkin vain vertailemalla niiden hypoteeseja empiirisiin havaintoihin. Toisaalta nämä mallit antavat myös valmiin teoreettisen kehikon, jonka avulla empiirisesti tarkastella teknologian kehityksen ulottuvuuksia ja T&K-panostusten seurauksia. Tässä luvussa on esitelty tärkeimpiä aiheeseen liittyviä empiirisiä havaintoja.

4.1 Empiirisen tutkimuksen lähestymistavat

Bond-Smith (2019, 1375) tiivistää, että empiirisesti eri sukupolven mallien hypoteeseja voidaan tarkastella kahdella pääasiallisella tavalla. Ensimmäinen tapa on pyrkiä estimoimaan meta-tuotantofunktion parametreja suoraan, jolloin saadaan suoraan arvio T&K-toiminnan ulkoisvaikutuksista, eli tiedon läikkymisen asteesta. Tämä kuvaa samalla sitä, miten uusien innovaatioiden ja ideoiden luominen vaikeutuu tai helpottuu tiedon kumuloituessa. Toinen empiirisen tutkimuksen tapa on tutkia suoraan mallien johtopäätöksiä pidemmällä aikavälillä, kuten tuottavuuskasvun ja väestönkasvun yhteyttä tai mallin muuttujien yhteisintegroituvuutta.

Meta-tuotantofunktio voidaan eri mallisukupolvien erottelemiseksi ilmaista ja estimoida muodossa $\dot{A} = \delta \left(\frac{X}{F}\right)^\gamma A^\theta$, missä X kuvaa nyt tutkimuspanosta (Ha & Howitt 2007). Ensimmäisen sukupolven ja semi-endogeenisten mallien tapauksessa valitaan $F = 1$, jolloin mitataan ainoastaan koko talouden tason tutkimuspanosta, mutta schumpeterilaisen kasvun tapauksessa termi X/F kuvaa puolestaan yksittäistä hyödykevariaatiota kohden laskettua tutkimuspanosta. Ensimmäisen sukupolven ja schumpeterilaiset mallit olettavat lisäksi $\theta = 1$, kun taas semi-endogeenisissä malleissa oletetaan $\theta < 1$. Lisäksi kaikissa malleissa pätee $\gamma > 0$. Ottamalla yhtälöstä puolittain logaritmi päädytään helposti estimoitavaan muotoon, ja parametrien estimaateista voidaan lukea kunkin mallisukupolven hypoteesien saama tuki.

Tämän Ha & Howittin (2007) esittämän meta-tuotantofunktion yleisen muodon estimointi voidaan suorittaa suoraan valitsemalla teknologian A proxyksi kumulatiivista

innovointia kuvaava muuttuja. Kun innovaatioiden \dot{A} proxyna käytetään esimerkiksi uusia patentteja, toimii olemassa olevan teknologian A proxyna hyvin luontevasti koko patenttikanta (ks. esim. Madsen 2008; Ang & Madsen 2011; 2015). Tutkimuspanoksen proxyna puolestaan käytetään yleensä T&K-työntekijöitä tai -menoja.

Hyödykevariaatioiden määrää on vaikeaa mitata suoraan, joten sen proxyn valinta on haastavampaa. Schumpeterilaisen kasvun malleissa variaatioiden määrä kasvaa kuitenkin samassa suhteessa väestön kanssa, joten hyödykevariaatiota kohden laskettu tutkimuspanos voidaan korvata esimerkiksi tutkijoiden työvoimaosuudella, eli tutkimusintensiteetillä, tutkimusmenojen osuudella kansantulosta, tai millä tahansa sellaisilla muuttujilla, jotka kehittyvät malleissa samassa suhteessa hyödykekohtaisen tutkimuspanoksen kanssa (Ha & Howitt 2007). Schumpeterilaista kasvua voidaan mallin ominaisuuksista johtuen tutkia tietenkin myös mikrotasolla, jolloin käsitellään aggregaattitasosta poiketen hyödyke- tai alakohtaisia kasvuasteita ja tutkimuspanoksia.

Toinen empiirisen tutkimuksen tapa on tutkia suoraan mallien pidemmän aikavälin johtopäätöksiä pidemmistä muuttujien aikasarjoista, koska mallit implikoivat erilaisia yhteisintegroituneita suhteita muuttujien välille. Tämä muuttujien yhteisintegroituvuus on mallien kannalta välttämätön, muttei riittävä ehto takaamaan minkään sukupolven mallien selitysvoimaa (Madsen 2008). Myös Romer (2012, 135) huomauttaa, että pelkkä stationaarisuuden tarkastelu muuttujien aikasarjoissa voi lopulta olla lähes täysin vailla informaatioarvoa: äärellisessä aikasarjassa esimerkiksi pitkäkestoinen tavallista korkeamman kasvun periodi on täysin yhteensopiva pysyvän kasvuasteen muutoksen hypoteesin kanssa, mutta toisaalta se on yhteensopiva myös hypoteesin kanssa, jonka mukaan kasvuaste palaa hitaasti takaisin aiempaan arvoonsa. Transitiodynamiikkaa on siis vaikea erottaa aineistoista, eikä pelkkä muuttujien aikasarjojen stationaarisuuden tarkastelu välttämättä tarjoa parasta informaatiota. Myös transitioperiodien vaikutusta on kuitenkin pyritty kontrolloimaan, kuten esimerkiksi Sedgley & Elmslie (2010).

Yhteisintegroituvuuden tarkastelua voidaan luontevasti täydentää erilaisilla kasvuregressioilla, joiden avulla voidaan esimerkiksi selvittää, selittääkö pidemmän aikavälin tuottavuuden kasvuastetta tutkimuspanoksen taso, kuten ensimmäisen sukupolven malleissa, tutkimuspanoksen kasvuaste, kuten semi-endogeenisissa malleissa, vai tutkimusintensiteetti, kuten schumpeterilaisissa malleissa. Regressioita voidaan kontrolloida luonnollisesti myös muilla muuttujilla. Esimerkiksi Ha & Howitt (2007), Madsen (2008) Ang & Madsen (2011) sekä Barcenilla-Visús ym. (2014) ovat

sovittaneet kasvuregressioita johtamalla estimoivat yhtälöt suoraan ylempänä esitetystä meta-tuotantofunktion yleisestä muodosta.

Empiiriseen tarkasteluun liittyy keskeisesti ongelma oikeanlaisen funktionaalisen taloudellisen alueen määrittelemisessä. Suora maiden välinen vertailu ei välttämättä ole järkevää, koska teoriankin nojalla teknologia on ei-kilpailullista tietoa, jolle ei ole varsinaista estettä läikkyä maiden välillä. Uusissa tutkimuksissa tiedon virtaukset maiden välillä ovatkin tärkeässä roolissa. Esimerkiksi Madsen ym. (2010) osoittaa intialaisella aineistolla, että sekä kotimaisella että ulkomaisella T&K-toiminnalla on vaikutus kokonaistuottavuuden kasvuun. Toisaalta on samalla täysin selvää, ettei tieto leviä välittömästi ympäri maailmaa, vaan poliittiset, omistusoikeudelliset ja teknologian käyttämiseen liittyvät ongelmat hidastavat diffuusioprosessia. Pessoa (2010) osoittaa, että T&K-toiminnan vaikutus talouskasvuun eroaa eri maiden maiden välillä merkittävästi.

Teknologiarintaman kärjen identifiointi sekä eri alojen tai maiden etäisyys tämän rintaman kärkeen on tärkeä huomioida ja kontrolloida analyysissä, sillä etäisyys kärkeen tekee innovoinnin efektiivisistä kustannuksista matalampia (esim. Ha ym. 2009). Acemoglu ym. (2006) sekä Aghion & Howitt (2009) puolestaan osoittavat, että teknologiarintamasta jäljessä olevien maiden on mahdollista parantaa tuottavuuttaan huomattavasti muita nopeammin. 1700-luvulta alkaen teknologiarintaman kärjessä ovat olleet Alankomaat, sitten Iso-Britannia, ja viimeisimpänä Yhdysvallat (Romer 1986, 1008–1009). Empiirisessä analyysissä onkin pääosin hyödynnetty Yhdysvaltoja ja muita kehittyneitä läntisiä maita, jotka vähiten voivat harjoittaa suoraa teknologian imitointia.

Uusien mikroaineistojen saatavuus on antanut endogeenisten mallien tutkimukselle myös aivan uusia mahdollisuuksia, kun laajempi historiallinen aineisto sekä yritysten ja innovoijien välinen heterogeenisuus voidaan huomioida tutkimusasetelmassa, kuten Akcigit & Nicholas (2019) korostavat. Esimerkiksi Akcigit & Kerr (2018) ovat käyttäneet yritys- ja patenttikohtaista dataa huomioidakseen yrityksen sisäisten ja ulkopuolisten innovaatioiden erilaisen vaikutuksen markkinaosuuksiin. Lisäksi Acemoglu ym. (2018) mallintavat eri yrityksille erilaisen innovointipotentiaalin ja tutkivat, miten erilaisilla T&K-toimenpiteillä voidaan vaikuttaa resurssien allokoitumiseen kaikkein tuottavimmille toimijoille. Akcigit ym. (2017) puolestaan käyttävät laajaa ja historiallista patenttiaineistoa selvittääkseen kattavasti muun muassa henkisen pääoman, asumistiheyden, eriarvoisuuden ja sosioekonomisen taustan yhteyksiä innovointiin.

4.2 Ensimmäisen sukupolven mallit ja skaalavaikutus

Romerin (1990) alkuperäinen malli ja muut ensimmäisen sukupolven mallit ovat ajatukseltaan hyvin selkeitä ja intuitiivisia: teknologia on ei-kilpailullista tietoa, minkä takia tuotannolla on kasvavat skaalatuotot panostensa suhteen. Suurempi määrä ihmisiä ja tutkijoita tuottaa suuremman määrän uusia ideoita, joten teknologian kehityksen aste riippuu väestön koosta. Tämän myötä suuremmat taloudet kasvavat pieniä nopeammin, ja kasvava väestö tarkoittaa kasvavaa tuottavuuden kasvuastetta. Selkeästä intuitiosta huolimatta Romerin (1990) mallin pidemmän aikavälin johtopäätökset eivät ole saaneet paljoa empiiristä tukea, ja endogeeninen kasvuteoria hylkäsi melko nopeasti ensimmäisen sukupolven mallit.

Jones (1995a; 1995b) oli ensimmäisiä, jotka empiiristen havaintojen avulla kritisoivat ensimmäisen sukupolven mallien oletusta $\theta = 1$ sekä sen implikoimaa vahvaa skaalavaikutusta. Artikkelit ottivat esille havainnon tutkijoiden ja tutkimuksen määrän voimakkaasta noususta Yhdysvalloissa viimeisten vuosikymmenten aikana. Ensimmäisen sukupolven mallien pohjalta tämän olisi pitänyt tarkoittaa voimakasta tuottavuuden kasvuasteen nousua, mutta sen sijaan kokonaistuottavuuden kasvu on ollut stationaarista tai jopa trendiltään laskevaa. Sama ilmiö näkyy myös uudemmassa aineistossa, joka yhtä lailla näyttää kumoavan täysin ensimmäisen sukupolven mallien skaalavaikutuksen: itse asiassa uuden aineiston perusteella henkeä kohden lasketun tuotannon vakioinen kasvu näyttää edellyttävän niin kutsutun efektiivisen tutkijoiden määrän kaksinkertaistumista 13 vuoden välein (Bloom ym. 2020). Skaalavaikutus aiheuttaa myös teoreettiseen tarkasteluun hankalia rajoituksia aiemmin mainitun ”räjähtävän” kasvun hypoteesin takia.

Kun ideoiden mittarina käytetään kokonaistuottavuuden sijaan patentteja, ovat tulokset ristiriitaisempia. Aiempi empiirinen konsensus oli, että tutkimuspanosta kohden lasketut patentit laskivat voimakkaasti Yhdysvalloissa ennen 1990-lukua (Griliches 1994; Kortum 1997; Kogan ym. 2017), mutta tilanne on sittemmin kääntynyt pääläelleen (Kortum 1998 & Lerner 1998; Webb ym. 2018). Patenttidataa hyödyntäen hypoteesi $\theta = 1$ on saanut tukea esimerkiksi Porter & Sternin (2000) sekä Abdih & Joutzin (2006) artikkeleissa. Abdih & Joutz (2006) argumentoivatkin, että tulokset T&K-toiminnan heikosta vaikutuksesta kokonaistuottavuuteen heijastelevat ainoastaan sitä, että uusien ideoiden ja kokonaistuottavuuden kasvun välinen yhteys on hyvin heikko. Vahva skaalavaikutus voi siis päteä ja innovaatioiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti ilman

vaikutusta kokonaistuottavuuden kasvuun, mikä voi johtua esimerkiksi uuden teknologian hitaasta diffuusiosta tai kokonaistuottavuuden mittaamisen rajoitteista.

Ensimmäisen sukupolven mallien muiden johtopäätösten suora vertailu empiiriseen aineistoon on antanut malleille myös ristiriitaista tukea. Esimerkiksi aggregaattitason tutkimuspanoksen tasolla ei ole yhteyttä kasvuasteeseen (esim. Ang & Madsen 2011) eikä väestön koolla (ks. esim. Barro & Sala-i-Martin 2004; Laincz & Peretto 2006). Toisaalta voi olla, että skaalavaikutus kuvaa tilannetta ainoastaan hyvin pitkää aikahorisonttia tarkastellessa. Esimerkiksi modernien endogeenisten mallien ensiaskeleita ottaneen Romerin (1986) artikkelin useamman vuosisadan kattava aikasarja ei voi täydellisesti kumota hypoteesia kasvuasteiden nousutrendistä, vaikka sittemmin tapahtunut kokonaistuottavuuden kasvun stagnaatio on luonnollisesti yli 30 vuotta myöhemmin muuttanut tilannetta. Myös Kremerin (1993) tunnettu historiallinen katsaus antaa jonkinlaista tukea skaalavaikutukselle tarkasteltaessa jopa miljoonan vuoden taakse ulottuvaa aineistoa. Ajatus on mallintaa kehitystä malthusilaisen kehikon kautta, jossa teknologian kehitys kasvattaa ainoastaan väestön kokoa, eikä henkeä kohden laskettua tuotantoa. Tämä pätee historiallisessa perspektiivissä ainoastaan lukuun ottamatta viime vuosisataa. Kremerin (1993) aineistossa ihmispopulaation koolla ja sen kasvuasteella osoittautuu olevan lähes täysin lineaarinen yhteys, mikä malthusilaisessa kehikossa antaa ensimmäisen sukupolven mallien vahvalle skaalavaikutukselle täysin suoraa tukea. Myös Galor and Weil (2000) identifioivat malthusilaisen dynamiikan avulla historiallisia ajanjaksoja, jolloin jonkinlainen vahva skaalavaikutus näyttää olleen voimassa.

Romerin (1990) ja muiden ensimmäisen sukupolven mallien vaikutus myöhemmän endogeenisen kasvun tutkimuksen kannalta on ollut merkittävää, sillä se on luonut järkevän teoreettisen pohjan, jolla teknologian kehitys malleissa endogenisoituu. Teoreettinen ja empiirinen konsensus kuitenkin on hylännyt vahvan skaalavaikutuksen ja kallistunut myöhempien sukupolvien mallien kannalle, varsinkin käsitellessä modernia taloutta. Myöhempi empiirinen tutkimus on pyrkinyt lähinnä vertaamaan semi-endogeenisten ja schumpeterilaisten mallien saamaa tukea, eli sitä, onko kasvu semi-endogeenista vai täysin endogeenista ilman skaalavaikutusta.

4.3 Semi-endogeeninen vai schumpeterilainen kasvu?

Esimerkiksi Jonesin (1995a; 1995b) ja Bloomin ym. (2020) osoittama tutkimuspanoksen kasvu aggregaattitasolla ei välttämättä yksiselitteisesti vahvista semi-endogeenisten mallien johtopäätöksiä, sillä havainto on yhteensopiva myös schumpeterilaisen kasvun

kanssa, jossa tutkimuspanos jakaantuu yhä useammalle alalle. 2000-luvun empiirinen tutkimus ei ole voinut yksiselitteisesti vahvistaa kumpaakaan teoriaa, vaikka schumpeterilainen kasvu onkin saanut aavistuksen enemmän tukea (Bond-Smith 2019).

Ang & Madsen (2011) estimoivat meta-tuotantofunktion suoraan käyttäen kuuden Aasian ”kasvuihmeeksi” kutsutun valtion paneeliaineistoa ja patenteja innovaatioiden mittarina. Tutkijoiden muodostamat estimaatit antavat vahvaa tukea schumpeterilaiselle kasvulle, eli $\theta = 1$, eivätkä tulokset riipu siitä, käytetäänkö tutkimuspanoksen mittarina T&K-menoja vai -työntekijöitä. Myös yhteisintegroituvuustestit tukevat johtopäätöstä. Ang & Madsen (2011) selittävät lisäksi kokonaistuottavuuden kasvuastetta tutkimuspanoksen kasvulla ja tutkimusintensiteetillä, ja yhtälöä kontrolloidaan etäisyydellä teknologiarintaman kärkeen. Tutkimusintensiteetti saa tilastollisesti merkitsevän positiivinen kertoimen, mikä on vahvasti linjassa schumpeterilaisen kasvun hypoteesien kanssa.

Samankaltainen asetelma on myös aiemmassa Madsenin (2008) OECD-maiden aineistoa käsittelevässä tutkimuksessa, ja tulokset tukevat samaan tapaan schumpeterilaista kasvua sekä hypoteesia $\theta = 1$. Uudempi ja laajempi Ang & Madsenin (2015) tutkimus hyödyntää puolestaan yli sadan vuoden mittaista patenttiaikasarjaa Yhdysvalloista, Iso-Britanniasta, Saksasta ja Aasian kasvuihmeistä. Parametrin θ estimaatit ovat hyvin lähellä yhtä, mutta pääosin hieman sen alapuolella. Muut havainnot aineistossa kuitenkin ovat ristiriidassa semi-endogeenisen kasvun hypoteesien kanssa, joten tutkijat kallistuvat jälleen schumpeterilaisen kasvun kannalle.

Toimialakohtaisissa tarkasteluissa schumpeterilainen kasvu on saanut tukea muun muassa Ulkun (2007) OECD-maiden neljää teollisuuden toimialaa käsittelevässä tarkastelussa, sillä tutkimusintensiteetti selittää innovointia aineistossa vahvasti. Myös toimialakohtaista patentointia on hyödynnetty empiirisessä tarkastelussa, ja esimerkiksi Venturini (2012) estimoimet meta-tuotantofunktion suoraan Yhdysvaltojen teollisuuden toimialakohtaista patenttiaineistoa hyödyntäen. Tulokset antavat vahvaa tukea hypoteesille $\theta = 1$.

Ha & Howitt (2007) argumentoivat schumpeterilaisen kasvun puolesta, sillä tutkijoiden Yhdysvaltoja käsittelevässä aineistossa T&K-panoksen kasvu on hidastunut samalla, kun kokonaistuottavuuden kasvussa ei ole selkeää laskutrendiä. Tämä sotii semi-endogeenisten mallien hypoteeseja vastaan. Kokonaistuottavuuden trendi on tosin sittemmin kääntynyt selkeämpään laskuun, joten tulokset voivat olla vanhentuneita. Sedgley & Elmslie (2010) puolestaan tutkivat Yhdysvaltojen kasvu- ja T&K-aikasarjojen

yhteisintegroituvuutta kontrolloimalla lisäksi transitiodynamiikan vaikutuksia, ja löytävät samaan tapaan enemmän tukea schumpeterilaiselle kasvulle.

Myös useissa muunlaisissa tutkimuksissa on tehty havaintoja trendeistä, jotka näyttävät tukevan schumpeterilaisen kasvun hypoteeseja. Klenow & Bils (2001), jotka mittaavat hyödykevariaatioiden kasvua Yhdysvaltojen kuluttajahintaindeksin hyödykekorin muutoksilla, estimoivat noin prosentin vuotuisen variaatioiden kasvun 1900-luvun loppupuoliskolle. Tämä kasvuaste vastaa melko tarkasti väestönkasvua Yhdysvalloissa, mikä on täsmälleen linjassa schumpeterilaisten mallien ennusteiden kanssa. Myös Peretto (2016) korostaa, miten vaikeaa on empiirisesti ollut kumota hypoteesia väestön koon ja tuotevariaatioiden välisestä kiinteästä suhteesta. Sen sijaan väestönkasvulla ja tuottavuuskasvulla ei semi-endogeenisten mallien hypoteesien vastaisesti ole minkäänlaista positiivista yhteyttä keskenään (ks. esim. Barro & Sala-i-Martin 2004; Strulik ym. 2013). Laincz & Peretto (2006) puolestaan arvioivat tuotelinjakohtaisia T&K-panostuksia Yhdysvalloissa, eivätkä löydä menoilte selkeää kasvutrendiä. Tutkijat arvioivat tämän selittävän schumpeterilaisen kehikon kautta, miksi tuottavuuskasvussa ei ole havaittavissa nousua tutkijoiden määrän kasvusta huolimatta. Laincz & Peretto (2006) löytävät lisäksi schumpeterilaisten mallien ennustaman positiivisen yhteyden yritysten keskimääräisen koon ja tuottavuuskasvun välille.

Kuitenkin myös semi-endogeeninen kasvu on saanut melko laajaa empiiristä tukea, joten varsinaista lopullista konsensusta aiheesta ei ole. Esimerkiksi Barcenilla-Visús ym. (2014) käyttävät samankaltaista lähestymistapaa kuin Madsen (2008) sekä Ang & Madsen (2011) hyödyntämällä kuuden kehittyneen maan ja kymmenen eri teollisuudenalan aineistoa. Tutkijat löytävät semi-endogeeniselle kasvulle voimakkaampaa tukea sekä yhteisintegroituvuustestien että kokonaistuottavuuden kasvua selittävän mallin avulla. Tutkijat kuitenkin tulkitsevat aineiston perusteella, että T&K-tuilla on merkittävä vaikutus siihen, miten nopeasti teknologiarintaman kärjestä jäljessä olevat toimijat saavat kärkeä kiinni, mutta tämä voi selittyä semi-endogeenisessä kehikossa transitiodynamiikalla.

Patentteja innovoinnin mittarina käyttävistä tutkimuksista semi-endogeenisen kasvun ja parametriarvon $\theta < 1$ kannalle kallistuvat myös esimerkiksi Ying (2008), Furman ym. (2002), Luintel & Khan (2009) sekä Ramzi & Salah (2018), joista ensimmäinen estimoii meta-tuotantofunktion Kiinan aineistosta, kaksi keskimmäistä OECD-maiden aineistoista ja viimeksi mainittu Välimeren alueen eurooppalaisten maiden aineistosta. Lisäksi esimerkiksi Hu & Mathews (2005; 2008) päätyvät samaan

tulokseen Itä-Aasian ja Kiinan aineistoilla silloin, kun teknologian tason mittarina käytetään henkeä kohden laskettua BKT:ta.

Neves & Sequeiran (2018) kattava meta-analyysi koostaa tärkeän joukon meta-tuotantofunktion parametrille θ annettuja suoria estimaatteja. Analyysi kontrolloi huolellisesti muun muassa erilaiset teknologian tason ja innovoinnin proxyjen valinnat, sekä ulkomaisen tiedon läikkymisen vaikutukset, ja päätyy θ :n estimaattiin, joka on alle yhden, mutta kuitenkin melko lähellä sitä. Siten Neves & Sequeira (2018) kallistuvat semi-endogeenisen kasvun kannalle, mutta koska estimaatin arvo on niin lähellä yhtä, korostaa artikkeli kuitenkin T&K-toiminnan tukemisen merkittäviä positiivisia vaikutuksia lyhyemmällä aikavälillä. Lisäksi artikkeli huomioi, että monen analyysissä mukana olleen tutkimuksen muut johtopäätökset saattavat sotia semi-endogeenisia malleja vastaan. Analyysi havaitsee myös, että patenttikannan käyttäminen teknologian tason mittarina johtaa yleensä korkeampiin θ :n estimaatteihin. Sequeira & Neves (2020) ovat tutkineet myös ”varpaille astumista” kuvaavan parametrin suuruutta meta-regression avulla ja päätyneet noin arvoon 0,2.

Jotkin alun perin Jonesin (1995a: 1995b) esille nostamat pitkän aikavälin trendit tukevat semi-endogeenista kasvua. Jones (2002) laskee semi-endogeenisten mallien ennustaman transitiodynamiikan avulla, että Yhdysvaltojen edeltävien vuosikymmenten kasvusta 80 prosenttia selittyy itse asiassa koulutustason ja tutkimusintensiteetin kasvulla. Nämä muuttujat eivät kuitenkaan voi kasvaa rajatta, ja siten tasapainoisen kasvu-uran tuottavuuden kasvu voi olla merkittävästi aiemmin havaittua hitaampaa. Artikkelin johtopäätökset tukevat semi-endogeenista kasvua, jossa koulutustason ja tutkimusintensiteetin kasvulla on vaikutusta vain tuottavuuden tasoon, muttei pitkän aikavälin kasvuasteeseen.

Koska yksittäisen hyödykevariaation tason meta-tuotantofunktio on tarkastelun kannalta oleellinen, ottavat Bloom ym. (2020) merkittävän askeleen tarkastellessaan tutkimuksen tuottavuutta myös mikrotasolla. Schumpeterilaisen kasvun hypoteesi on, että tutkimuspanoksen tuottavuus on vakio yksittäisen yrityksen tai tuotantolinjan kohdalla, mutta Bloom ym. (2020) ensimmäisinä osoittavat efektiivisen tutkimuspanoksen nousseen vailla yhteyttä teknologiseen kehitykseen myös tällä tarkastelun tasolla. Artikkelin esimerkit käsittelevät Mooren lakia, elinajanodotetta, terveydenhuollon avulla säästettyjä elinvuosia sekä eri maataloustuotteiden satoja, ja kaikissa tapauksissa on havaittavissa selkeä laskutrendi tutkimuksen tuottavuudessa. Artikkelin vahvuus on verrata tutkimuspanosta mikrotasolla suoraan hyvin konkreettisiin teknologisen

kehityksen mittareihin aiempien epäsuorien mittareiden sijaan. Bloom ym. (2020) käsittelevät myös hyvin laajaa yhdysvaltalaisista yritysaineistoa ja havaitsevat T&K-toiminnan tuottavuuden heikentyneen valtaosassa aineiston yrityksistä. Näyttää siis siltä, että mikrotasolla pätee pääosin $\theta < 1$. Esimerkiksi myös Ulku (2007), Venturini (2012) ja Barcenilla-Visús (2014) ovat tutkineet sektorikohtaisia aineistoja, mutta nämä tutkimukset käsittelevät vain eri toimialojen suurempia aggregaatteja.

Eräs epäsuorasti semi-endogeeniselle kasvulle tukea antava tapa tarkastella tilannetta on myös Benjamin Jonesin (2009; 2010) asetelma. Jones osoittaa ensipatentoijien iän nousseen ajan myötä, ja lisäksi nouseva teknologian taso näyttää edellyttävän yksilöiltä yhä pitkäkestoisempaa koulutusta teknologiarintaman kärjen saavuttamiseksi. Tämä tiedon yleinen kumuloituminen siten edellyttää Jonesin (2010) mukaan tutkijoiden voimakkaampaa erikoistumista yhä kapeampiin aihe-alueisiin, mikä edellyttää myös suurempien tiimien hyödyntämistä luovassa työskentelyssä. Tämä taas sitoo yhä enemmän työvoimaa.

5 TAPAUSTUTKIMUS: TUULIENERGIA

Tässä luvussa endogeenisten kasvumallien hypoteeseja testataan mikrotaloudellista tapaustutkimusta hyödyntäen, kuten Bloom ym. (2020), koska schumpeterilaisten mallien kannalta oleellinen tarkastelun taso on nimenomaan yksittäisen hyödykkeen tai tuotelinjan taso. Tarkasteltava teknologia on tuulienergia, jonka kehitystä voidaan mitata erilaisilla kustannuksiin ja tuuliturbiinien ominaisuuksiin liittyvillä muuttujilla, ja johon liittyvää tutkimustoimintaa voidaan puolestaan mitata aihepiirin eri toimijoiden T&K-investoinneilla.

5.1 Metodi ja tavoitteet

Schumpeterilaisten endogeenisten mallien oletusta alakohtaisen meta-tuotantofunktion lineaarisuudesta voidaan tarkastella mikrotason tapaustutkimusten avulla, kuten Bloom ym. (2020). Tarkoituksena on siis selvittää, onko niin kutsuttu tutkijoiden tuottavuus vakio eri teknologioiden kohdalla. Bloom ym. (2020) kuvaavat tutkijoiden tuottavuudella sitä, kuinka suuri tasapainoinen kasvuaste voidaan saada aikaan milläkin tutkijoiden määrällä, eli käsite voidaan kuvata suoraviivaisesti ja yksinkertaistaen seuraavasti:

$$\text{Kasvu (\%)} = \text{Tutkijoiden tuottavuus} \times \text{Tutkijoiden määrä}$$

Tämä on eräänlainen meta-tuotantofunktion konkreettinen muoto. Jos tarkoituksena on tarkastella hypoteesia vakioisesta tutkimuksen tuottavuudesta, tulee siis yksinkertaistaen tarkastella seuraavaa osamäärää:

$$\text{Tutkijoiden tuottavuus} = \text{Kasvu (\%)} / \text{Tutkijoiden määrä}$$

Hyödyntäen tavanomaista schumpeterilaisten endogeenisten mallien kehikkoa voidaan aivan sama asia esittää matemaattisesti kuten luvussa 3.4. Alakohtainen teknologian kehitysyhtälö on muotoa $\dot{A}_t/A_t = \delta L_{A,t}$.⁴ Kasvuaste on tutkimuspanoksen ja tutkimuksen tuottavuusparametrin tulo, ja tutkimuksen tuottavuus δ on:

⁴ Tästä eteenpäin aikamuuttuja on merkitty alaindeksillä.

$$\delta = \frac{\dot{A}_t/A_t}{L_{A,t}}. \quad (5.1)$$

Schumpeterilainen hypoteesi on, että tämä osamäärä on vakio. Siten tarkastelemalla alakohtaisen teknologian kehitysvauhdin ja efektiivisen tutkijoiden määrän suhdetta voidaan selvittää, miten hyvin hypoteesi pitää paikkansa ajan saatossa. Jos taas vaihtoehtoisesti meta-tuotantofunktio kirjoitetaankin muodossa $\dot{A}_t = \delta L_{A,t}^\gamma A_t$, jossa siis sallitaan myös ”varpaille astuminen”, ei tarkastelu muutu oleellisesti. Tällöin yhtälön 5.1 nimittäjä on $L_{A,t}^\gamma$, joka voidaan tulkita eräänlaiseksi todelliseksi tutkimuspanokseksi, josta on poistettu tutkimuksen päällekkäisyyden vaikutus.

Endogeenisissa malleissa tutkimuspanos on usein ilmaistu tutkijoiden työpanoksena, mutta käytännössä tarkkoja T&K-työvoimaan liittyviä aineistoja on harvoin saatavilla, sillä T&K-panostukset on yleensä ilmaistu ainoastaan rahallisina. T&K-menoihin sisältyy lisäksi luonnollisesti muitakin menoja kuin työvoimakustannuksia, mikä hankaloittaa tarkastelua. Bloomin ym. (2020) ratkaisu on ilmaista tutkimuspanos niin sanotun efektiivisen tutkijoiden määrän avulla, joka voidaan laskea jakamalla kaikki nimelliset T&K-menot $R_{n,t}$ tutkijoiden keskimääräisellä nimellisellä palkkatasolla w_t :

$$L_{A,t} = \frac{R_{n,t}}{w_t}. \quad (5.2)$$

Saatu luku kuvaa sitä efektiivistä tutkijoiden lukumäärää, joka kyseisellä rahasummalla olisi palkattavissa, ja muuttuja kontrolloi menojen kautta myös esimerkiksi erilaatuisen tutkimustyön. Muuttujan yksikkö kuvaa siis rahan sijaan ihmisten lukumäärää tarkastelun edellyttämällä tavalla. Pelkkien rahallisten tutkimusmenojen käyttäminen johtaisi vääjäämättä tulkintaan laskevasta tutkimuksen tuottavuudesta, koska talouden tasapainouralla palkat kasvavat tuottavuuden kasvaessa, ja vakiomäärä tutkimusta tarkoittaa jatkuvasti yhä suurempia rahallisia panostuksia.

5.2 Tuulivoimaan liittyvä teknologinen kehitys

Energiateknologian merkitys on noussut 2000-luvulla suuresti sitä mukaa, kun tieto ilmastonmuutoksesta on lisääntynyt. Valtaosa maailman hiilidioksidipäästöistä syntyy energiantuotannosta (Our World in Data 2020), ja siten energiateknologian kehityksellä

ja uusiutuvilla energianlähteillä on tärkeä merkitys ilmastonmuutoksen torjunnassa. Yksi tärkeimmistä uusiutuvista energianlähteistä ja teknologioista on juuri tuulivoima. Tutkijoiden tuottavuuden selvittäminen edellyttää tuulivoimaan liittyvää indikaattoria, jolla teknologian kehitystasetta voidaan mitata.

Energiateknologian tarkastelua on pitkään hallinnut kokemus- ja oppimiskäyrien soveltaminen, mikä perustuu historialliseen havaintoon kumulatiivisen asennetun kapasiteetin tai tuotetun energian määrän hyvin säännönmukaisesta yhteydestä tuotantokustannuksiin. Oppimis- ja kokemuskäyrien avulla muun muassa hintaennusteiden laatiminen tulevaisuuteen on ollut helppoa. Vaikka näin tarkastellen tuotetun määrän tai kapasiteetin vaikutus energiantuotannon kustannuksiin näyttää selkeältä, ei havainto kuitenkaan itsessään takaa syy-seuraussuhdetta tuottavuuden kasvun ja kumuloituvan tuotantokokemuksen välillä. Energiantuotannon kustannuksia on siksi pyritty selittämään myös moniulotteisemmin, kuten esimerkiksi usean selittävän muuttujan oppimiskäyrillä. Näiden avulla on havaittu muodollisen tutkimuksen olevan usein merkittävämpi kustannuksia alentava tekijä kuin tekemällä oppiminen. (Pizer & Popp 2008.)

Vaikka tarkastelussa ei sovelleta perinteisiä oppimiskäyriä, käytetään kustannuksia kuitenkin samaan tapaan tuulivoiman teknologian kehityksen mittarina. Sopivin kustannuksien mittari on tuuliturbiinien koko elinkaaren aikana aiheuttama kustannus tuotettua energiayksikköä kohden, eli LCOE-kustannus (engl. Levelised Cost of Energy), joka on yleisesti käytetty mittari eri energianlähteiden vertailuun (IRENA 2020). Tuulivoiman kohdalla LCOE-kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa tuuliturbiinien hinta, tuulivoimaloiden käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä energiakäyttökerroin, joka kuvaa tietyllä aikavälillä voimalaitoksen tuottaman energian suhdetta siihen energiaan, joka olisi voitu tuottaa voimalan toimiessa jatkuvasti nimellisteholla (Elia ym. 2020). Tuulivoimaan liittyvällä T&K-toiminnalla näihin tekijöihin voidaan vaikuttaa usealla tavalla, sillä esimerkiksi turbiinien valmistuksen tuottavuutta parantavat innovaatiot laskevat turbiinien hintaa, turbiinien korkeuden ja lapojen halkaisijan kasvu parantaa voimaloiden energiakäyttökerrointa, ja myös esimerkiksi merituulivoiman kehitys voi alentaa kustannuksia (Thresher ym. 2008; Wiser & Bolinger 2019; Elia ym. 2020).

Vaikka lähes kaikki teknologiset kehitysaskeleet vaikuttavat suorasti tai epäsuorasti tuulivoiman kustannuksiin, eivät pelkät tuotantokustannukset tai hinnat kuitenkaan aina suoraan kerro tuottavuuden kehityksestä, sillä energianlähteen hintaan vaikuttavat monet

muutkin tekijät kuin puhtaat teknologiset kehitysharppaukset. Tuuliturbiinien kustannuksiin ja tuulivoiman hintoihin vaikuttavat myös muun muassa raaka-aineiden hinnat, materiaalien käyttö, työvoimakustannukset, oikeus- ja rahoituskulut, skaalatuottojen aste sekä tuotantoketjujen ja markkinoiden dynamiikka (Elia ym. 2020). Näiden tekijöiden voimakkaat muutokset saattavat peittää alleen teknologisen kehityksen todellisen asteen, ja siten on hyödyllistä hyödyntää myös muita indikaattoreita. Melko suoraviivaisesti turbiinien kehitystä kuvaa niiden nimelliskapasiteetin kasvu, joka kuvaa suurinta turbiinilla tuotettavissa olevaa kapasiteettia (Thresher ym. 2008; Wiser & Bolinger 2019). Siten nimelliskapasiteettia käytetään tarkastelussa toisena teknologian indikaattorina.

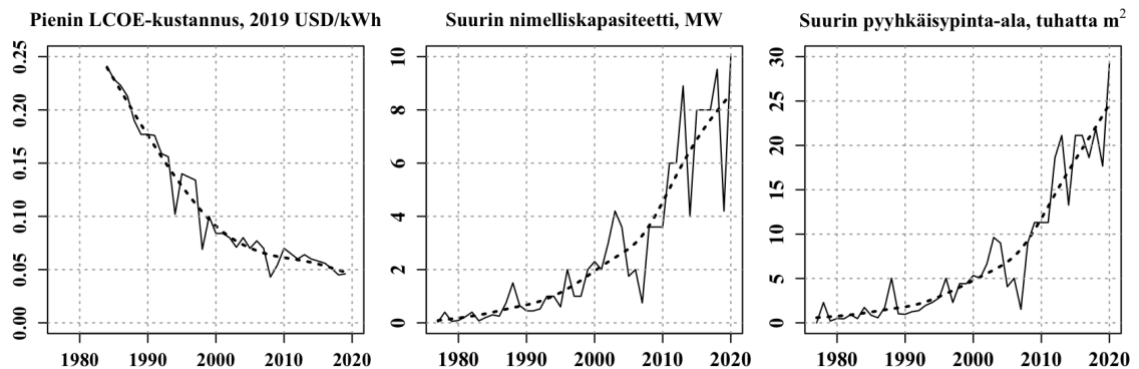
Lisäksi indikaattorina on hyvä käyttää mittaria, joka kuvaa energiakäyttökertoimen kehitystä, eli sitä, kuinka lähellä nimelliskapasiteettia turbiini voi keskimäärin toimia. Energiakäyttökerroin vaikuttaa siten keskeisesti turbiinien kustannustehokkuuteen. Hyödyllinen tarkasteltava muuttuja on esimerkiksi nimelliskapasiteetin ja turbiinien roottorien pyyhkäisypinta-alan välinen suhde, jonka pieneneminen johtaa korkeampaan energiakäyttökertoimeen (Wiser & Bolinger 2019). Koska tämä suhde on kääntäen verrannollinen roottorien pyyhkäisypinta-alaan, käytetään pyyhkäisypinta-alaa kolmantena teknologian kehityksen indikaattorina.

Vaikka yksikään käytetyistä mittareista, LCOE-kustannus, nimelliskapasiteetti tai roottorien pyyhkäisypinta-ala, ei kuvaa kaikkea tuulivoimaan liittyvää teknologista kehitystä, kattavat ne kuitenkin kolmesta suuren osan. Jos yhdenkin mittarin kehitysaste kiihtyy tai taantuu muiden mittarien kasvuasteen pysyessä vakiona, saadaan viitteitä koko tuulienergiateknologian kasvuasteen muutoksista.

Tuulivoiman LCOE-kustannukset ovat olleet voimakkaassa laskussa useita vuosikymmeniä, ja samaan aikaan turbiinien keskimääräinen nimelliskapasiteetti ja roottorien koko ovat kasvaneet. Vuonna 2019 maatuulivoiman LCOE-kustannuksen maailmalaajuinen painotettu keskiarvo oli 0,053 \$/kWh, kun se vielä vuonna 1983 oli 0,308 \$/kWh (IRENA 2020). Tanskassa, joka on pitkään ollut tuulivoiman edelläkävijä, on asennettujen turbiinien suurin nimelliskapasiteetti puolestaan vuosina 1983–2020 kasvanut 400 kW:sta 10 MW:iin, ja roottorien suurin halkaisija 54 metristä 193 metriin (Energistyrelsen 2021).

5.3 Aineisto

Teknologian kehitystä kuvaavat indikaattorit, turbiinien nimelliskapasiteetti ja roottorien pyyhkäisypinta-ala, kerätään Tanskan aineistosta, sillä maa on vuosikymmeniä ollut tuulivoiman edelläkävijöitä, ja Tanskan energiaviranomainen (Energistyrelsen) kerää aineistoa kaikista maan asennetuista turbiineista. Teknologian tason arvoksi valitaan kunkin vuoden asennettujen turbiinien nimelliskapasiteettien ja roottorien pyyhkäisypinta-alojen suurin arvo Energistyrelsenin (2021) tietokannasta. Vuosittaiseksi LCOE-kustannuksen arvoksi valitaan puolestaan IRENAN (2020) tietokannasta kunkin vuoden matalin keskimääräinen kustannus koko maailmassa.⁵ Näin pyritään saavuttamaan kaikilla mittareilla arvio teknologiarintaman kärjen sijainnista kunakin ajanhetkenä, eikä diffuusiovauhti vaikuta suureisiin. Aikasarjoista lasketaan trendit HP-suodinta käyttäen parametrilla $\lambda = 100$, ja näistä trendeistä lasketaan vuosittaiset kasvuasteet. Tanskan teknologia-aineisto kattaa vuodet 1977–2020 ja LCOE-aineisto vuodet 1984–2019. Teknologiamuuttujien aikasarjat on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1. Tuulienergiaan liittyvä teknologinen kehitys.

Tuulivoimaan liittyvien tutkimuspanostuksien arvioimiseen hyödynnetään IEA:n (2021) tietokantaa tuulivoimaan liittyvistä julkisrahoitteisista T&K-panostuksista sekä 20 tärkeimmän tuuliturbiinien valmistajan T&K-menoja aikavälillä 2000–2019. Aineisto kattaa kaikki OECD-maiden julkisrahoitteiset menot sekä valtaosan tuuliturbiinien markkinoista, jotka ovat voimakkaasti keskittyneet muutamalle suurelle valmistajalle,

⁵ IRENAN (2020) aineisto kattaa sekä maa- että merituulivoiman. Merituulivoiman kustannukset ovat 2000-luvulla laskeneet, mutta LCOE-kustannus ei ole vielä alittanut maatuulivoimaa. Siten kaikki LCOE-kustannuksen arvot kuvaavat maatuulivoimaa, vaikka myös merituulivoima on huomioitu.

kuten Vestas, GE ja Siemens Gamesa. Kaikki arvot on muutettu euroiksi kunkin vuoden lopussa vallitsevilla valuuttakursseilla.

Suuri osa valmistajista on erikoistunut puhtaasti tuuliturbiineihin, jolloin T&K-menot on laskettu kokonaisuudessaan tuulienergiaan liittyviksi. Sen sijaan osalle valmistajista tuuliturbiinit muodostavat vain pienen osan kaikesta tuotannosta, jolloin tuulienergiaan liittyvien T&K-menojen osuus on arvioitu hyödyntäen esimerkiksi eri osastojen liikevaihtojen suhteita tai tuulienergiaan liittyvien patenttihakemusten osuuksia. Samankaltaista lähestymistapaa on hyödyntänyt myös Wiesenthal ym. (2009). Luettelo yrityksistä sekä T&K-menojen hakumenetelmä on tarkemmin esitelty liitteessä 1.

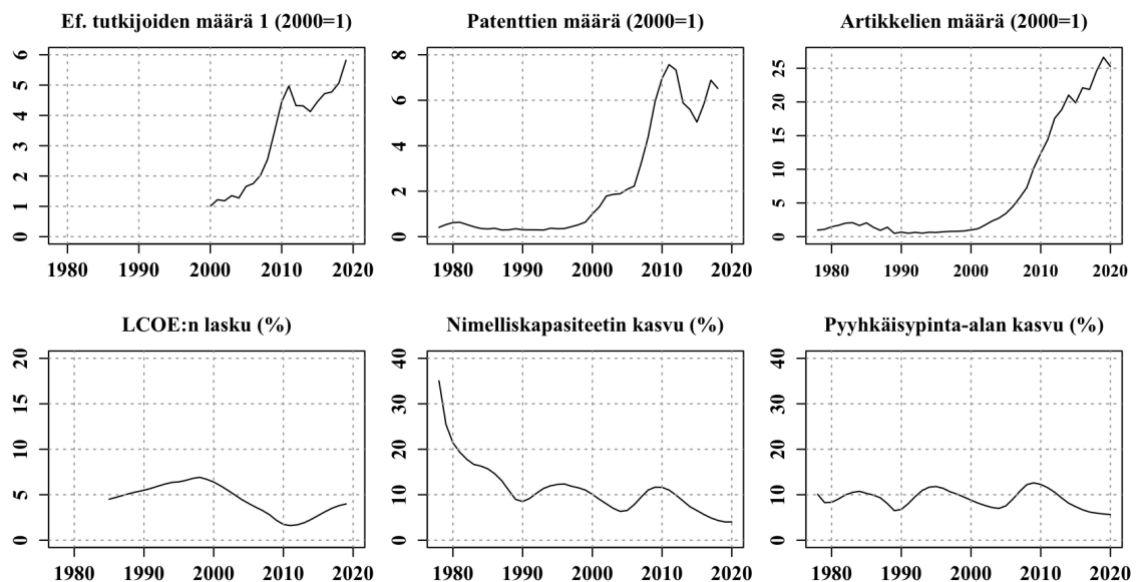
Lopuksi yhteenlasketut nimelliset T&K-menot deflatoidaan tutkijoiden arvioidulla nimellispalkalla, jotta saavutetaan arvio efektiivisestä tutkijoiden määrästä. Tuuliturbiineihin liittyvä T&K-toiminta on luonnollisesti jakautunut ympäri maailmaa, eikä tutkimuksen palkkataso ole täysin yksiselitteinen, mutta analyysin kannalta oleellista on kuitenkin vain nimellispalkan kasvuvauhti. Siten palkkakuvaajaksi valitaan OECD:n (2021a) palkka-aineistosta vuosittainen keskipalkka Tanskassa, joka on yksi tärkeimmistä maista tuulivoiman tutkimuksen kannalta. Vaihtoehtoisesti tarkastelu suoritetaan olettamalla tutkijoiden palkkojen kasvun olevan joka vuosi 1,5-kertaa nopeampaa Tanskan keskipalkkaan nähden. Jatkossa keskimääräisen palkkakehityksen olettava aikasarja on nimeltään ”Efektiivinen tutkijoiden määrä 1” ja korkeamman palkkakehityksen olettava aikasarja ”Efektiivinen tutkijoiden määrä 2”.

Koska energiateknologian T&K-panostukset korreloivat voimakkaasti alan patenttihakemusten määrän kanssa (Nemet & Kammen 2007), käytetään tutkimuspanoksen tason proxyna myös PATSTAT-patenttitietokannan maailmanlaajuisia aineistoa tuulivoimaan liittyvistä vuosittaisista patenttihakemuksista, joita kuvaa IPC-patenttiluokitus ”F03D”. Lisäksi hyödynnämme vastaavalla tavalla proxyna Scopus-tietokannan aineistoa vuosittaisista tuulivoimaan liittyvien tutkimusartikkelien lukumääristä, joiden etsimisessä käytetään avainsanahakua. Näiden kahden proxyn etu on myös se, että aikasarjat ulottuvat pidemmälle menneisyyteen. Patenttiaikasarja kattaa vuodet 1978–2018 ja artikkeliaikasarja vuodet 1978–2020.

5.4 Tulokset

Eri tavoin mitattu tutkimuspanoksen kasvu on esitetty kuviossa 2 ja taulukossa 1. Tuulivoiman efektiivinen tutkijoiden määrä on kasvanut parissa vuosikymmenessä

huomattavasti. Olettamalla tutkijoiden palkkakehityksen vastaavan Tanskan keskipalkkaa on tutkimuspanoksen taso noin kuusinkertaistunut vuosina 2000–2019, ja vaihtoehtoista palkkakuvaajaa käyttäen tutkimuksen taso on noin 4,5-kertaistunut. Myös artikkelien ja patenttien määrän kehitys osoittaa tutkimuspanoksen merkittävän kasvun. Vuosina 1978–2018 tuulivoimaan liittyvien patenttihakemusten vuosittainen lukumäärä on noin 16-kertaistunut, ja vuosina 1978–2020 tieteellisten artikkelien vuosittainen määrä on peräti 26-kertaistunut. Sekä efektiivinen tutkijoiden määrä että patentit osoittavat tutkimuspanoksen saavuttaneen selkeän piikin vuonna 2011, jonka jälkeisen pienen taantumisen jälkeen kasvu on taas jatkunut. Patenteilla ja artikkeleilla mitattu tutkimuspanos antaa viitteitä tutkimuksen tason vakiintumisesta ennen 2000-lukua ja sen voimakkaasta kasvusta 2000-luvulle tultaessa.



Kuvio 2. Tuulienergian tutkimuspanos ja teknologian kehitysaste.

Sen sijaan teknologiaa kuvaavissa indikaattoreissa ei kehitysvauhdin kasvua ole havaittavissa. LCOE-kustannuksen ja pyyhkäisyypinta-alan kehityksen taso on pysynyt melko vakaana, kun taas nimelliskapasiteetin kasvuvauhdissa on havaittavissa laskeva trendi. Tästä johtuen tutkimuksen tuottavuus on kaikilla mittareilla mitattuna laskenut merkittävästi. Kun ”varpaille astumista” ei huomioida, tuottavuuden vuosittainen negatiivinen kasvu on eri arviot huomioon ottaen 7,6 ja 13,2 prosentin välillä, mikä tarkoittaa, että vakioisen kehitysvauhdin ylläpitäminen vaatii tutkijoiden määrän kaksinkertaistumista noin 5,5–9,5 vuoden välein. Tulos on hyvin linjassa Bloomin ym.

(2020) raporttoimien eri alojen arvioiden kanssa, sillä näissä tapaustutkimuksissa tutkijoiden tuottavuuden puoliintumisaika vaihtelee 10 vuoden molemmin puolin.

Taulukko 1. Tuulienergian tutkimuspanoksen ja tutkijoiden tuottavuuden muutos.

Taulukossa esitetyt luvut esittävät vuosimuutoksen geometrista keskiarvoa pisimmällä aikavälillä, joka valituilla muuttujakombinaatioilla on muodostettavissa. Tutkimuksen tuottavuuden arvo on määritelty yhtälöllä: Tutkijoiden tuottavuus = Kasvu (%) / Tutkimuspanos. Tutkimuspanosta kuvaavien muuttujien aikasarjat käsittävät seuraavat vuodet: efektiivinen tutkijoiden määrä 2000–2019, patentit 1978–2018, artikkelit 1978–2020. Teknologian kasvuastetta kuvaavat muuttujat puolestaan kattavat seuraavat vuodet: LCOE 1985–2019, nimelliskapasiteetti 1978–2020, pyyhkäisyypinta-ala 1978–2020.

	Ef. tutkijoiden määrä 1	Ef. tutkijoiden määrä 2	Patentit	Artikkelit
Keskim. vuosimuutos				
Tutkimuspanos	9,7%	8,3%	7,2%	8,1%
Tut. tuottavuus, $\gamma = 1$				
LCOE	-11,1%	-9,9%	-9,0%	-7,6%
Nimelliskapasiteetti	-13,2%	-12,0%	-11,4%	-12,1%
Pyyhkäisyypinta-ala	-10,9%	-9,9%	-7,9%	-8,7%
Tut. tuottavuus, $\gamma = 3/4$				
LCOE	-9,0%	-8,1%	-7,0%	-5,8%
Nimelliskapasiteetti	-11,1%	-10,3%	-9,9%	-10,4%
Pyyhkäisyypinta-ala	-8,8%	-8,1%	-6,3%	-6,9%

Koska tuulivoiman teknologian kehityksasteessa ei ole havaittavissa nousua tutkimuspanoksen kasvusta huolimatta, ei myöskään ”varpaille astumisen” huomioiminen kumoa havaintoa laskevasta tutkimuksen tuottavuudesta. Tutkimuksen tuottavuus on taulukossa 1 laskettu erikseen myös kiinnittämällä γ :lle arvo 0,75, ja tulokset ovat hyvin samansuuntaisia.

5.5 Huomioita

Monet asiat oheisessa tarkastelussa saattavat olla ongelmallisia ja aiheuttaa tuloksiin harhaa. Ensinnäkin arvio yksityisistä T&K-menoista ei ole täydellinen, sillä kaikkia tuuliturbiineja ja tuulienergiaa kehittäviä yrityksiä ei ole voitu huomioida. Vanhojen, jo toimintansa lopettaneiden yritysten tietoja on rajoitetummin saatavilla, joten on olemassa valikoitumisharhan riski. Tällöin 2000-luvun alkuvuosien tuuliturbiinien markkina voi olla aliedustettuna, ja ensimmäisten vuosien arviot tutkimusmenoista saattavat olla aliarvioituja. Tämä puolestaan johtaa liian voimakkaaseen arvioon tutkimuksen tuottavuuden heikentymisestä. Aineiston keruussa on kuitenkin pyritty huomioimaan tuuliturbiinien valmistuksen markkinatilanne koko 2000-luvun ajalta, ja suurimmat

valmistajat ovat pysyneet melko samoina koko tarkasteltavalla aikavälillä. Lisäksi on huomioitava, että myös aikasarjan viimeisten vuosien T&K-menot saattavat samaan tapaan olla huomattavasti aliarvioituja, sillä tuuliturbiinien markkina on kasvanut viime vuosien aikana voimakkaasti, ja erityisesti Aasiaan on syntynyt lukuisia uusia valmistajia, joiden T&K-menoja ei ole laskettu mukaan. Markkinan voimakkaan kasvun takia yksityisten T&K-menojen kasvun arvio on todennäköisemmin liian alhainen, eikä päinvastoin.

Yksityisten T&K-menojen kasvuun harhaa voivat aiheuttaa myös yritysostot ja fuusiot. Kaikki T&K-menojen kasvu ei ole orgaanista, vaan osa syntyy esimerkiksi suurten yritysten ostaessa pienempiä ja saaden käyttöön näiden tutkimusresursseja. Jos ostettu yritys ei ole mukana aiempien vuosien T&K-menojen laskemisessa, saadaan liian korkea arvio todellisesta T&K-menojen kasvusta. Aineistoa kerätessä tärkeimmät yritysostot ja fuusiot on kuitenkin pyritty huomioimaan.

Yksityisten menojen lisäksi myös julkiset menot saattavat olla aliarvioituit. IEA:n (2021) aineistossa on useita aukkoja, ja julkisten T&K-menojen summa kuvaa ainoastaan saatavilla olevien menojen summaa. Aukot painottuvat kuitenkin aikaan ennen 2000-lukua, joten ne eivät vaikuta T&K-menojen aikasarjaan, joka kattaa vain 2000-luvun. Suurin ongelma julkisten menojen aikasarjassa lienee kuitenkin IEA:han kuulumattomien maiden, erityisesti Kiinan, tutkimusmenojen puute. IEA:n (2020) raportti antaa kuitenkin viitteitä siitä, että Kiinan julkiset energiateknologian T&K-menot ovat nousussa, joten on hyvin epätodennäköistä, että julkisten T&K-menojen kasvu olisi aineistossa yliarvioitu.

Harhaa voi myös aiheuttaa, jos tuulivoiman kannalta merkittävää tutkimusta on tapahtunut tarkastelun ulkopuolisilla talouden sektoreilla, ja joilta tietoa on läikkynyt tuulivoiman alalle. On esimerkiksi selvää, että energia-alalla tapahtuva muu turbiineihin ja sähköverkkoihin liittyvä kehitys on hyödyttänyt myös tuulienergian alaa. Jos tämän läikkymisen laajuus muilta aloilta on jostakin syystä vähentynyt tasaisesti ajan mittaan, voi arvio jälleen antaa liian voimakkaan kuvan tutkimuksen tuottavuuden laskusta. Toinen teoreettinen ongelma on, jos osa aineistossa mitatusta T&K-panoksesta onkin luokiteltavissa schumpeterilaisten mallien kuvaamaksi horisontaaliseksi tutkimukseksi.

6 MALLIEN TESTAUS TEOLLISUUDEN AINEISTOLLA

Tässä luvussa endogeenisten mallien hypoteeseja testataan hyödyntämällä Yhdysvaltojen teollisuudenalojen aineistoa vuosina 1981–2015. Lähestymistapoja on kolme: aikasarjojen stationaarisuuden testaaminen, kokonaistuottavuuden kasvua selittävä regressiomalli sekä meta-tuotantofunktion suora estimointi patenttiaineistosta. Edellisen luvun ja Bloomin ym. (2020) laskelmien pohjalta voidaan esittää hypoteesi, jonka mukaan hyödykekohtainen meta-tuotantofunktio ei ole lineaarinen teknologian tason suhteen. Siten endogeenisten mallien hypoteeseja pyritään testaamaan asetelmalla, jossa sallitaan laskeva tutkijoiden tuottavuus myös yksittäisten hyödykevariaatioiden kohdalla. Tässä luvussa semi-endogeenisellä kasvulla viitataan juuri tämänkaltaiseen kasvuun.

6.1 Metodi

6.1.1 Yksikköjuuritestit

Merkitään tutkimuspanosta nyt muuttujalla X_t . Kuten aiemmin, kokonaistuottavuuden kasvun oletetaan schumpeterilaisissa malleissa määräytyvän meta-tuotantofunktion avulla seuraavasti:

$$\dot{A}_t = \delta \left(\frac{X_t}{F_t} \right)^\gamma A_t. \quad (6.1)$$

Kokonaistuottavuuden kasvu riippuu siis hyödykettä kohden lasketusta tutkimuspanoksesta X_t/F_t ja teknologian tasosta A_t . Hyödykevariaatiota kohden laskettua tutkimuspanosta kutsutaan tästä eteenpäin vain tutkimusintensiteetiksi.

Edetään tarkastelussa seuraavaksi samansuuntaisesti kuin muun muassa Ha & Howitt (2007), Madsen (2008), Ang & Madsen (2011) sekä Barcenilla-Visús ym. (2014). Jakamalla yhtälö 6.1 puolittain A_t :lla ja ottamalla luonnollinen logaritmi voidaan yhtälö esittää seuraavan yhtälön avulla, jossa virhetermi ϵ_t on riippumaton ja identtisesti jakautunut odotusarvolla nolla:

$$\ln \left(\frac{\dot{A}_t}{A_t} \right) = \ln \delta + \gamma \ln \left(\frac{X_t}{F_t} \right) + \epsilon_t. \quad (6.2)$$

Nyt jos kokonaistuottavuuden kasvu \dot{A}_t/A_t on stationaarinen, täytyy myös tutkimusintensiteetin olla stationaarinen. Tutkimusintensiteetin havaittu integroituvuus puolestaan ei ole tällöin yhteensopiva schumpeterilaisen kasvun ennusteen kanssa.

Tämä tutkimusintensiteetin stationaarisuuteen liittyvä ehto kuvaa sitä, miten hyvin schumpeterilaiset endogeeniset mallit yleisesti sopivat kuvaamaan aineistoa. Ha & Howitt (2007), Madsen (2008), Ang & Madsen (2011) sekä Barcenilla-Visús ym. (2014) käsittelevät eri mallityyppien muuttujien integroituvuutta ja yhteisintegroituvuutta myös laajemmin, mutta tämän tutkielman viitekehyksessä aikasarjojen yhteisintegroituvuutta ei testata.

Stationaarisuuteen ja yhteisintegroituvuuteen liittyvät ehdot ovat kuitenkin vain välttämättömiä, mutta eivät riittäviä ehtoja takaamaan endogeenisten mallien selitysvoimaa (Madsen 2008). Siten tarkastelua täydennetään kokonaistuottavuuden kasvua selittävällä mallilla.

6.1.2 Kokonaistuottavuuden kasvua selittävä malli

Schumpeterilaisissa malleissa A_t :n kasvuaste voidaan aiempaan tapaan johtaa meta-tuotantofunktiosta 6.1. Kokonaistuottavuuden kasvuaste riippuu tutkimusintensiteetin tasosta:

$$g_A = \frac{\dot{A}_t}{A_t} = \delta \left(\frac{X_t}{F_t} \right)^\gamma. \quad (6.3)$$

Bloomin ym. (2020) ja luvun 5 esimerkit antavat kuitenkin viitteitä siitä, ettei hyödykekohtainen meta-tuotantofunktio välttämättä ole lineaarinen teknologian tason suhteen, eli voidaan esittää hypoteesi, jonka mukaan hyödykekohtaisen tutkimuspanoksen on jatkuvasti kasvettava tasaisen kasvun ylläpitämiseksi. Tämän hypoteesin testaamiseksi muokataan meta-tuotantofunktiota seuraavasti:

$$\dot{A}_t = \delta \left(\frac{X_t}{F_t} \right)^\gamma A_t^\theta. \quad (6.4)$$

Lisäksi oletetaan, että pätee $\theta < 1$. Jos A_t :n kasvuaste g_A oletetaan vakioksi, voidaan differentioinnin avulla meta-tuotantofunktiosta johtaa muoto

$$g_A = \frac{\gamma g_s}{1 - \theta}, \quad s = \frac{X_t}{F_t}. \quad (6.5)$$

Yllä g_s kuvaa siis tutkimusintensiteetin X_t/F_t kasvuastetta. Yleensä semi-endogeenista kasvua on testattu olettamalla $F_t = 1$, mutta nyt tätä oletusta ei tehdä. Tutkimusintensiteetti kuvaa hyödykekohtaista tutkimuspanosta, joka kasvaa malleissa samassa suhteessa kuin tutkijoiden työvoimaosuus ja tutkimusmenojen suhde kokonaistuotantoon. Siten tutkimusintensiteetti ei voi kasvaa rajatta, eikä jatkuvasti kasvava tutkimusintensiteetti voi kuvata yhdenkään mallin talouden tasapainoista kasvu-uraa. Kyse on siis ainoastaan hyvin pitkän aikavälin transitiodynamiikasta. Bloomin ym. (2020) ja luvun 5 esimerkkien pohjalta asetelma on kuitenkin mielekäs, vaikkei se perustukaan yhdenkään mallin mikroteoreettiseen yleiseen tasapainoon.

Yhtälöiden 6.3 ja 6.5 pohjalta muotoillaan kokonaistuottavuuden kasvua selittävä regressiomalli, kuten muun muassa Madsen (2008), Ang & Madsen (2011) sekä Barcenilla-Visús ym. (2014), ja yhtälössä yhdistyvät yllä esitetyt kaksi eri mallityyppiä:

$$\Delta \ln A_t = \kappa \ln \left(\frac{X_t}{F_t} \right) + \left(\frac{\gamma}{1 - \theta} \right) \Delta \ln \left(\frac{X_t}{F_t} \right). \quad (6.6)$$

Kokonaistuottavuuden kasvua selitetään siis tutkimusintensiteetillä sekä sen kasvulla. Semi-endogeenisen kasvun tapauksessa pätee $\kappa = 0$ ja $\gamma/(1 - \theta) > 0$, koska kokonaistuottavuuden kasvuaste riippuu tutkimusintensiteetin kasvusta eikä sen tasosta. Kun taas $\kappa > 0$, pätee tavanomainen schumpeterilainen kasvu. Täytyy kuitenkin huomioida, että myös tavanomaisen schumpeterilaisen kasvun tapauksessa tutkimusintensiteetin kasvu voi saada nollasta poikkeavan kertoimen, koska tutkimusintensiteetin kasvulla on transiiovaikutuksia.

Asetelma on muuten identtinen Madsenin (2008), Ang & Madsenin (2011) sekä Barcenilla-Visúsin ym. (2014) kanssa, mutta tärkeänä erona on, että pelkän tutkimuspanoksen kasvun sijaan toisena selittävänä muuttujana on tutkimusintensiteetin kasvuaste. Pelkän tutkimuspanoksen kasvuasteen käyttäminen toisena selittäjänä jättää huomiotta uusien hyödykevariaatioiden synnyn, joten tässä mielessä tutkimusintensiteetin kasvuaste voi olla mielekkäämpi semi-endogeenista kasvua testaava muuttuja. Tämä kuitenkin edellyttää yllä mainittua oletusta, jonka mukaan talous ei ole tasapainoisella kasvu-uralla.

6.1.3 Meta-tuotantofunktion suora estimointi

Meta-tuotantofunktio pyrkii kuvaamaan uusia ideoita, eli innovaatioita. Kuten aiemmin todettua, kenties käytetyimpiä innovaatioiden mittareita ovat patentit, jotka määritelmällisesti kuvaavat jotakin uudenlaista keksintöä, ja johon patentin omistaja saa yksinoikeuden. Siten yritys-, tai hyödykekohtainen meta-tuotantofunktio pyritään estimoimaan myös suoraan käyttämällä juuri patenteja innovaatioiden mittarina. Patenttiaineiston etu kokonaistuottavuuteen nähden on, että estimointi voidaan suorittaa vuosittaisia havaintoja hyödyntäen, koska patentointi ei ole kokonaistuottavuuden tapaan yhtä altis suhdannetekijöistä riippuvalle variaatiolle, eivätkä negatiiviset arvot ole mahdollisia (Ang & Madsen 2011).

Koska schumpeterilaisissa malleissa talouden tasapaino on symmetrinen, voidaan meta-tuotantofunktion muuttujat ilmaista talouden hyödykevariaatiota kohden laskettuina keskiarvoina. Jos siis nyt merkitään muuttujilla \dot{A}_t^P , X_t ja A_t^P koko toimialan uusia innovaatioita, tutkimuspanosta ja kumulatiivista tietoa, ja lisäksi F_t kuvaa toimialan hyödykevariaatioiden lukumäärää, on hyödykekohtainen meta-tuotantofunktio muotoa:

$$\frac{\dot{A}_t^P}{F_t} = \delta \left(\frac{X_t}{F_t} \right)^\gamma \left(\frac{A_t^P}{F_t} \right)^\theta. \quad (6.7)$$

Tämä vastaa luvussa 3.4. esitettyä yhtälöä 3.19. Ottamalla yhtälöstä puolittain luonnollinen logaritmi ja järjestelemällä termejä voidaan yhtälö ilmaista muodossa

$$\ln \dot{A}_t^P = \ln \delta + \gamma \ln X_t + \theta \ln A_t^P + (1 - \gamma - \theta) F_t. \quad (6.8)$$

Yhtälön 6.8 empiirinen vastine voidaan estimoida vuosittaisista havainnoista. Innovointia \dot{A}_t^P mitataan tarkastelussa patenttihakemuksilla ja teknologian tasoa A_t^P koko patenttikannalla. Estimoitavan parametrin θ arvo on jälleen erityisen mielenkiinnon kohteena. Jos θ saa arvon, joka on alle yhden, saa semi-endogeenisen kasvun hypoteesi tukea, kun taas arvo $\theta = 1$ tukee schumpeterilaisia malleja. Asetelma on sama kuin esimerkiksi Venturinilla (2012). Nyt teoriassa sallitaan myös arvo $\theta < 1$ samalla, kun $F_t > 1$, vaikka tämä ei suoraan vaikutakaan estimoitavaan yhtälöön.

6.2 Aineisto

Aineisto muodostaa paneeliaselman Yhdysvaltojen teollisuuden toimialoista⁶ vuosilta 1981–2015. Toimialat on jaoteltu ISIC Revision 4 -toimialaluokituksen mukaan.

Toimialakohtainen kokonaistuottavuuden taso on vakiintuneeseen tapaan laskettu Cobb-Douglas-tuotantofunktion avulla seuraavasti:

$$A_{it} = \frac{Y_{it}}{H_{it}^{0,7} K_{it}^{0,3}}. \quad (6.9)$$

Tässä Y_{it} kuvaa toimialan i reaalista arvonlisäystä, H_{it} toimialan tehtyjä työtunteja ja K_{it} toimialan kiinteää pääomakantaa. Panosjoustot on valittu vakiintuneen tavan mukaan.

Pääomakanta on laskettu niin kutsuttua investointikertymämenetelmää (engl. perpetual inventory method) ja geometrista poistoastetta käyttäen seuraavasti:

$$K_{it} = I_{it} + (1 - \varphi)K_{it-1}, \quad K_{i0} = \frac{I_{i1}}{\varphi + g_i}. \quad (6.10)$$

K_{it} kuvaa T&K-kantaa periodin t lopussa, I_{it} kuvaa periodin t investointeja kiinteään pääomaan, ja φ on poistoaste, jonka oletetaan olevan kaikilla toimialoilla 0,15. K_{i0} , lasketaan Hall & Mairessen (1995) yhtälöllä, jossa I_{i1} kuvaa investointeja vuonna 1970 ja g_i on I_{it} :n keskimääräinen vuosikasvu vuosina 1970–1980. Toimialojen reaalin arvonlisäys, tehdyt työtunnit ja reaaliset investoinnit kiinteään pääomaan on kerätty OECD:n (2021d) STAN-tietokannasta. Reaaliset suureet on ilmaistu vuoden 2010 dollareina.

Tutkimuspanosta mitataan T&K-menoilla sekä edelliseen luvun tapaan efektiivisellä tutkijoiden määrällä. Toimialakohtaiset reaaliset T&K-menot (R_{it}) on kerätty EU KLEMS -tietokannan vuoden 2017 julkaisusta muuttamalla nimellisarvoiset menot ($R_{n,it}$) vuoden 2010 dollareiksi Yhdysvaltojen BKT-deflaattoria käyttäen. Efektiivinen

⁶ Käytetyt ISIC Rev. 4 -luokituksen mukaiset aggregaattitoimialat ovat: C10–C12: ”Food products, beverages and tobacco”, C13–C15: ”Textiles, wearing apparel, leather and related products”, C16–C18: ”Wood and paper products; printing and reproduction of recorded media”, C19: ”Coke and refined petroleum products”, C20–C21: ”Chemicals and chemical products”, C22–C23: ”Rubber and plastics products, and other non-metallic mineral products”, C24–C25: ”Basic metals and fabricated metal products, except machinery and equipment”, C26–C27: ”Electrical and optical equipment”, C28: ”Machinery and equipment n.e.c.” ja C29–C30: ”Transport equipment”.

tutkijoiden määrä on puolestaan laskettu jakamalla nimelliset T&K-menot tutkijoiden keskimääräisellä nimellisellä palkkatasolla w_t :

$$L_{A,it} = \frac{R_{n,it}}{w_t}. \quad (6.11)$$

Bloomin ym. (2020) tapaan tutkijoiden palkkatason mittarina vuosille 1991–2015 käytetään USCB:n (2020) aikasarjaa kandidaatin tai ylemmän tutkinnon saavuttaneiden miesten keskipalkasta. Vuosille 1981–1990 arviona käytetään puolestaan vähintään neljä vuotta korkeakoulua käyneiden miesten keskipalkkaa samassa aineistossa.

Tutkimusintensiteetin laskemisessa hyödynnetään neljää erilaista proxya:

$$\left(\frac{X_{it}}{F_{it}}\right)_A = \frac{R_{it}}{Y_{it}} \quad (6.12)$$

$$\left(\frac{X_{it}}{F_{it}}\right)_B = \frac{L_{A,it}}{L_{it}} \quad (6.13)$$

$$\left(\frac{X_{it}}{F_{it}}\right)_C = \frac{L_{A,it}}{ENT_{it}} \quad (6.14)$$

$$\left(\frac{X_{it}}{F_{it}}\right)_D = \frac{L_{A,it}}{TM_{it}} \quad (6.15)$$

Näistä ensimmäinen kuvaa reaalisten tutkimusmenojen suhdetta arvonlisäykseen, toinen efektiivisen työvoiman suhdetta toimialan koko työllisyyteen (L_{it}), kolmas efektiivistä tutkijoiden määrää yritystä (ENT_{it}) kohden ja neljäs efektiivistä tutkijoiden määrää tavaramerkkiä (TM_{it}) kohden. Näistä kaksi ensimmäistä kuvaavat tutkimusintensiteettiä, joka kehittyy schumpeterilaisissa malleissa identtisesti hyödykevariaatiota kohden lasketun tutkimuspanoksen kanssa (Ha & Howitt 2007). Kaksi jälkimmäistä puolestaan mittaavat efektiivistä tutkijoiden määrää suoria hyödykevariaatioiden mittareita kohtaan.

Toimialojen kaikkien työllisten lukumäärä on kerätty OECD:n (2021d) STAN-tietokannan aineistosta. Toimialakohtainen yritysten lukumäärä on kerätty puolestaan OECD:n (2021c) SDBS-tietokannasta, ja aikasarja kuvaa kaikkien vähintään yhden henkilön työllistävien aktiivisten yritysten lukumäärää. OECD:n yritysten lukumäärää kuvaava aineisto kattaa vuodet 1981–2012, ja vuosille 2013–2015 arvio yritysten lukumäärästä on ekstrapoloitu hyödyntämällä tarkasteltavien toimialojen yritysten

lukumäärän kasvuasteita. Nämä kasvuasteet vuosille 2013–2015 on laskettu UNIDON (2020) yritysten lukumäärää kuvaavasta tietokannasta.⁷ Yritysten lukumäärä on ilmaistu molemmissa tietokannoissa vanhempaa ISIC Revision 3 -toimialaluokitusta käyttäen, mutta toimialojen suuremmat aggregaatit ovat pysyneet lähes identtisinä luokitusten välillä. Siten hyvin suurella tarkkuudella yritysten lukumäärä pystytään linkittämään ISIC Rev. 3:n ja Rev. 4:n välillä.

Myös tavaramerkkikannan laskemisessa käytetään investointikertymämenetelmää ja geometrasta poistoastetta:

$$TM_{it} = \dot{TM}_{it} + (1 - \varphi)TM_{it-1}, \quad TM_{i0} = \frac{\dot{TM}_{i1}}{\varphi + g_i}. \quad (6.16)$$

Nyt TM_{it} kuvaa tavaramerkkikantaa periodin t lopussa ja \dot{TM}_{it} kuvaa periodin t uusia rekisteröityjä tavaramerkkejä. Poistoasteen φ oletetaan jälleen olevan kaikilla toimialoilla 0,15. \dot{TM}_{i1} on tässä tapauksessa uusien rekisteröityjen tavaramerkkien määrä vuonna 1981 ja g_i on \dot{TM}_{it} :n keskimääräinen vuosikasvu vuosina 1981–1991. Tavaramerkkiaineisto kerätään Yhdysvaltojen patentti- ja tavaramerkkiviraston aineistosta (USPTO 2020b), joka kuvaa kaikkia tavaramerkkihakemuksia. Vain rekisteröidyksi tulleet kotimaiset tavaramerkit huomioidaan, ja tavaramerkki merkitään kotimaiseksi, jos sen ensimmäisenä mainitun omistajan osoite on yhdysvaltalainen. Lopuksi Nizzan tavaramerkkiluokituksen mukaiset tavaramerkkien lukumäärät jaetaan ISIC Revision 4 -luokituksen mukaisille toimialoille hyödyntäen Lybbertin ym. (2014) kehittämää painotusta. Koska suurella osalla tavaramerkkejä on useampi kuin yksi Nizzan luokitus, merkitään yksittäisestä tavaramerkistä yksi hakemus jokaiseen sen edustamaan tavaramerkkiluokkaan.⁸ Tavaramerkkiaineisto pitää sisällään vain ne rekisteröidyt tavaramerkit, joista kaikki tarvittavat tiedot ovat saatavilla ja linkitettävissä toisiinsa.

Hyödykevariaatioiden lukumäärää pyritään meta-tuotantofunktion estimoinnissa mittaamaan siis kahdella suoralla mittarilla, mikä tuo esimerkiksi Venturin (2012)

⁷ UNIDON (2020) yritysten lukumäärää kuvaavan aineiston määritelmä on hieman poikkeava ja historiallisessa aineistossa on katkoja, joten aineistoa ei voida tarkastelussa suoraan yhdistää OECD:n (2021c) aineistoon. Yritysten määrän kasvuaste sen sijaan soveltuu hyvin OECD:lta saatavan aikasarjan ekstrapoloimiseen.

⁸ Tämä toimintatapa on perusteltu, koska yksittäistä tavaramerkkiä kohden voidaan valmistaa hyvin erilaisia tuotteita.

asetelmaan nähden uutta tarkkuutta. Koska suorina mittareina käytetään Laincz & Peretton (2006) tapaan yritysten⁹ lukumäärää ja toisena vaihtoehtona tavaramerkkien lukumäärää, pyritään asetelmalla selittämään itse asiassa yritys- ja tavaramerkkikohtaista innovointia. Tämän oletetaan kuvaavan schumpeterilaisten mallien kuvaamaa hyödykekohtaista tasoa. Koska käytössä on koko talouden tason sijaan teollisuuden toimialakohtainen aineisto, saavat arviot hyödykekohtaisista suureista enemmän tarkkuutta kuin Laincz & Peretton (2006) kaltaisessa asetelmassa, jossa yritysten määrää mitataan ainoastaan koko talouden tasolla. Lisäksi tavaramerkkien hyödyntäminen hyödykevariaatioiden määrän suorana mittarina on ollut Madsenin (2008) lisäksi melko vähäistä.¹⁰

Meta-tuotantofunktion suorassa estimoinnissa käytetyn patenttikannan A_{it}^P laskemisessa käytetään jälleen investointikertymämenetelmää, mutta pääomakannasta poiketen arvo kuvaa kannan suuruutta periodin alussa:

$$A_{it}^P = A_{it-1}^P + (1 - \varphi)A_{it-1}^P, \quad A_{i1}^P = \frac{A_{i1}^P}{\varphi + g_i}. \quad (6.17)$$

Poistoasteen φ oletetaan olevan kaikilla toimialoilla 0,15. \dot{A}_{i1} kuvaa uusia patenteja vuonna 1981, ja g_i on \dot{A}_{it} :n keskimääräinen vuosikasvu vuosina 1981–1991. Patenttiaineiston lähteenä on käytetty Yhdysvaltojen patentti- ja tavaramerkkiviraston aineistoa (USPTO 2020a) kaikista patenttihakemuksista. Tarkasteluun mukaan otetut hakemukset kuvaavat viraston myöntämiä kotimaisia Utility-patentteja hakemusvuoden¹¹ mukaan. Vain myönnettyjen patenttien voidaan olettaa kuvaavan täysin uusia innovaatiota, joten kaikkia hakemuksia ei huomioida. Patenttihakemus on luokiteltu kotimaiseksi, jos patenttihakemuksessa ensimmäisenä mainittu keksijä on kansalaisuudeltaan yhdysvaltalainen. Näin karsitut patentit on jaoteltu vielä ISIC

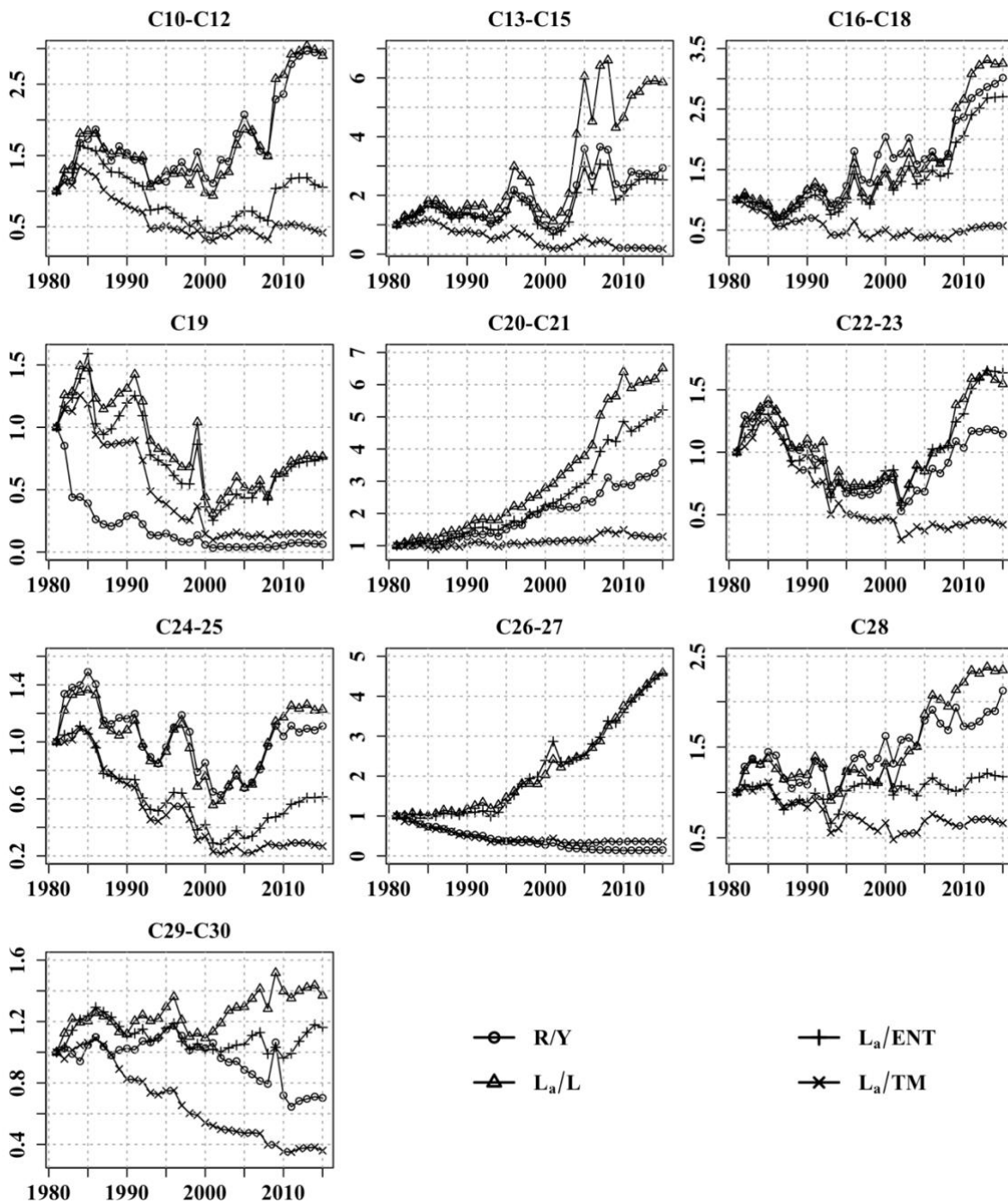
⁹ Tarkalleen ottaen Laincz & Peretto (2006) käyttävät variaatioiden mittarina yritysten (engl. enterprise) sijaan tuotantolaitosten (engl. establishment) lukumäärää, koska yksittäinen tuotantolaitos tuottaa yleensä vain yhtä hyödykettä, mutta yritys käsittää pelkän hallinnollisen kokonaisuuden.

¹⁰ Tämän tutkielman kirjoittajan tiedossa ei ole endogeenisen kasvuteorian empiiriseen testaamiseen liittyvää tutkimusta, jossa olisi hyödynnetty toimialakohtaisesti jaettuja tavaramerkkien tai yritysten määriä hyödykevariaatioiden mittarina.

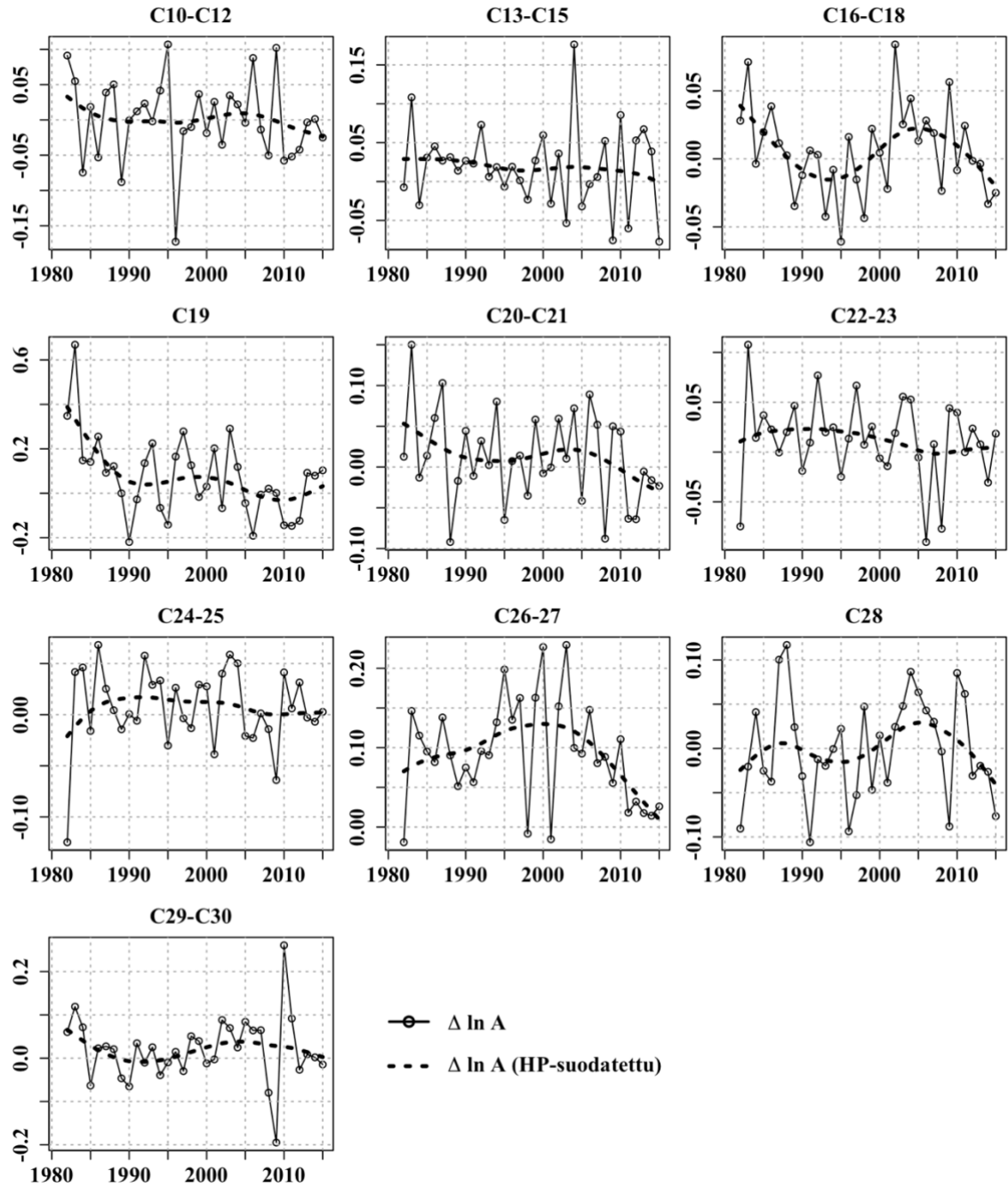
¹¹ Jostain syystä vuonna 2003 aineistossa on huomattava piikki kotimaisten patenttihakemusten määrässä ilman selkeää nousua kaikkien patenttihakemusten määrässä. Ilmiön voimakkuudesta johtuen se ei voi selittyä kuin datan ongelmasta, jossa osa ulkomaisista patenteista näkyy virheellisesti kotimaisina. Vuoden 2003 toimialakohtainen kotimaisten patenttihakemusten lukumäärä on siten korvattu vuosien 2002 ja 2004 keskiarvolla.

Revision 4 -luokituksen mukaisille toimialoille hyödyntäen jälleen Lybbertin ym. (2014) kehittämää painotusta, jonka avulla eri IPC-patenttiluokkien patenttien vuosittaiset lukumäärät painotetaan eri toimialoille.

Kuviossa 3 on esitetty toimialakohtainen tutkimusintensiteetin taso. Visuaalinen tarkastelu osoittaa, että tutkimusintensiteetin tasossa on huomattavaa variaatiota eri proxyjen välillä, ja useassa tapauksessa on havaittavissa selkeä aikatrendi. Kuviossa 4 on puolestaan esitetty kokonaistuottavuuden kasvuaste, joka vaikuttaa stationaariselta.



Kuvio 3. Yhdysvaltojen teollisuussektorin tutkimusintensiteetin kehitys (1981=1).



Kuvio 4. Yhdysvaltojen teollisuussektorin kokonaistuottavuuden kasvuaste.

Kasvuasteen trendi on laskettu HP-suotimella käyttäen parametria $\lambda = 100$.

Tavaramerkkiä kohden laskettu efektiivinen tutkijoiden määrä antaa useimmissa tapauksissa alimman arvion tutkimusintensiteetin tasosta, ja useimmilla aloilla trendi on ollut laskeva. Muiden proxyjen trendi on joillakin toimialoilla selvästi positiivinen, mutta vain yhdellä toimialalla trendi on ollut yksiselitteisesti positiivinen (C20–C21). Mittarit antavat siis hieman ristiriitaisen kuvan siitä, onko hyödykevariaatiota kohden laskettu tutkimuspanos kasvanut. Koska kokonaistuottavuuden kasvu vaikuttaa stationaariselta, ei

visuaalinen tarkastelu anna tukea hypoteesille, jonka mukaan tutkimusintensiteetin olisi jatkuvasti nouseva tasaisen kasvun ylläpitämiseksi.

6.3 Estimointi ja tulokset

6.3.1 Yksikköjuuritestit

Ensimmäisenä vaiheena kokonaistuottavuuden ja tutkimusintensiteetin stationaarisuutta testataan paneeliyksikköjuuritesteillä. Käytetyt testit ovat Levin, Lin, & Chu (2002), Maddala & Wu (1999) Fisher-tyyppinen testi, Choin (2001) PP-testi, sekä Pesaranin (2007) testi, joka on robusti myös paneelin havaintoyksikköjen ollessa riippuvaisia toisistaan. Valittuja testejä on hyödyntänyt myös aiempi endogeenisen kasvun empiirinen kirjallisuus (esim. Ang & Madsen 2011; 2015; Barcenilla-Visús ym. 2014).

Testien tulokset on esitetty taulukossa 2. Kokonaistuottavuuden kasvu osoittautuu oletetulla tavalla stationaariseksi, mistä jo visuaalinen tarkastelu antoi viitteitä. Näin ollen voidaan siirtyä tarkastelemaan tutkimusintensiteetin stationaarisuutta. Schumpeterilainen kasvu edellyttää, että tutkimusintensiteetti on stationaarinen, mutta yksikköjuuritestit paljastavat, ettei nollahypoteesia yksikköjuuresta voida hylätä yhdenkään tutkimusintensiteetin proxyn kohdalla. Myös kuvion 3 aiempi visuaalinen tarkastelu tukee havaintoa. Schumpeterilainen kasvu ei siis saa tukea käytetyistä tutkimusintensiteetin aikasarjoista.

Taulukko 2. Paneeliyksikköjuuritestien tulokset.

Kokonaistuottavuuden kasvuastetta ja tutkimusintensiteettiä on testattu sisällyttämällä testien malliyhtälöihin vakiotermi. Kolmen ensimmäisen paneeliyksikköjuuritestin malliyhtälön viipeet on valittu automaattisesti käyttäen Akaiken informaatiokriteeriä ja maksimiviivettä 5. Pesaranin (2007) testissä käytetty viive on 1. Johtopäätös integroituvuudesta on muodostettu merkitsevyystasoa 0,05 käyttäen, eikä merkitsevyystason 0,1 käyttäminen oleellisesti muuta tuloksia.

Muuttuja	Levin, Lin, &	Maddala &	Pesaran		
	Chu (2002)	Wu (1999)	Choi (2001)	(2007)	Johtopäätös
$\Delta \ln A$	$I(0)$	$I(0)$	$I(0)$	$I(0)$	$I(0)$
$\ln(R/Y)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$
$\ln(L_A/L)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$
$\ln(L_A/ENT)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$
$\ln(L_A/TM)$	$I(0)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$	$I(1)$

Toisaalta kuvio 3 osoittaa, että tutkimusintensiteetin tason kehityssuunta on epäselvä, koska johtopäätös riippuu niin vahvasti hyödykevariaatioiden lukumäärän valitusta

proxysta. Ei siis ole täysin selvää, onko tarkasteltavilla toimialoilla keskimääräinen hyödykekohtainen tutkimuspanos laskenut vai noussut, eikä testien tuloksien voi siten tulkita kumoavan schumpeterilaisia malleja. Myös esimerkiksi Madsen (2008) toteaa, että yksikköjuuri- ja yhteisintegroituvuustesteissä havaitut epäjohtonmukaisuudet voivat kertoa itse asiassa lähinnä hyödykevariaatioiden lukumäärän mittaamisen vaikeudesta. Kokonaisuudessaan yksikköjuuritestit tarjoavat siis hyvin niukasti informaatiota schumpeterilaisten mallien kelvollisuudesta käytetyillä muuttujilla.

6.3.2 Kokonaistuottavuuden kasvua selittävä malli

Kokonaistuottavuuden kasvua selittävää mallia 6.6 testataan empiirisesti muodossa

$$\Delta \ln A_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_1 \ln \left(\frac{L_{A,it}}{F_{it}} \right) + \alpha_2 \Delta \ln \left(\frac{L_{A,it}}{F_{it}} \right) + TD + \varepsilon_{1,it}, \quad (6.18)$$

missä α_{0i} kuvaa toimialakohtaisia kiinteitä vaikutuksia, TD on toimialojen yhteinen aikadummy ja $\varepsilon_{1,it}$ stationaarinen virhetermi. Kasvuasteiden laskemisessa käytetään muuttujien useamman vuoden differenssejä, jolloin suhdanteista johtuvat vaihtelut eivät vaikuta yhtä merkittävästi tuloksiin. Käytetyt differenssit ovat 5- ja 9-vuotisia. Tutkimusintensiteetin arvo on puolestaan liukuva keskiarvo ajanjaksolta, jonka yli differenssi lasketaan. Kiinteä vaikutus ottaa huomioon pysyvät erot eri toimialoilla, kun taas yhteinen aikavaikutus kuvaa kaikille toimialoille yhteistä, muista tekijöistä johtuvaa kasvuasteen vaihtelua. Estimointi suoritetaan sekä ilman kiinteitä vaikutuksia että niiden kanssa, ja lisäksi käytetään tutkimusintensiteetin kaikkia eri proxyja. Yhtälö 6.18 estimoidaan pienimmän neliösumman menetelmällä.

5-vuotisilla differensseillä saadut tulokset on raportoitu taulukossa 3, ja ne tukevat selkeästi schumpeterilaista kasvua. Tutkimusintensiteetin kerroin saa positiivisen ja tilastollisesti merkitsevän kertoimen kuudessa tapauksessa kahdeksasta, ja kiinteiden vaikutusten huomioiminen nostaa vielä jonkin verran tutkimusintensiteetin kerrointa. Tulokset ovat robusteimmat, kun tutkimusintensiteetin proxyyna käytetään T&K-menojen suhdetta arvonlisäykseen tai efektiivisen tutkijoiden määrän suhdetta työllisyyteen. Hieman yllättäen tutkimusintensiteetin kasvun kerroin on negatiivinen kaikissa tapauksissa, mutta keskivirheet ja luottamusvälit ovat laajoja ja sisältävät myös positiivisen estimaatin. Kerroin on tilastollisesti merkitsevä vain silloin, kun tutkimusintensiteetin proxyyna käytetään T&K-menojen suhdetta arvonlisäykseen.

9-vuotisia differenssejä hyödyntäen tulokset ovat hyvin samankaltaiset (taulukko 4). Tutkimusintensiteetin kerroin on positiivinen ja tilastollisesti merkitsevä jälleen kuudessa tapauksessa kahdeksasta, ja kiinteiden vaikutusten huomioiminen kasvattaa kerrointa. Tutkimusintensiteetin kasvun kerroin saa jälleen merkitsevän ja voimakkaan negatiivisen kertoimen, kun tutkimusintensiteetin proxyna käytetään T&K-menojen suhdetta arvonlisäykseen. Muuten kasvuasteen kerroin on nyt pääosin positiivinen, mutta ei edelleenkään tilastollisesti merkitsevä. Aikadummyjen poistaminen ei oleellisesti muuta tuloksia, eikä niitä ole erikseen raportoitu.

Taulukko 3. Kokonaistuottavuuden kasvua selittävän mallin tulokset: 5-vuotiset differenssit.

Taulukossa on esitetty yhtälön 6.18 riippumattomien muuttujien kertoimien estimoidut arvot. Kaikki muuttujat kattavat vuodet 1981–2015. Differenssit kuvaavat 5-vuotisia differenssejä ja tutkimusintensiteetin eri proxyt saman aikavälin liukuvaa keskiarvoa. Viimeinen differenssi kuvaa aikaväliä 2011–2015. Sulkuihin merkitty luku kuvaa t-testisuureen arvoa, ja merkinnät *, ** ja *** kuvaavat merkitsevyystasoa 0.05, 0.01 ja 0.001. Vakiotermiä, aikadummyja ja kiinteitä vaikutuksia ei ole erikseen raportoitu. KV = kiinteät vaikutukset, Adj. R2 = mallin korjattu selitysaste.

Vastemuuttuja: $\Delta \ln A$								
$\ln(R/Y)$	0,138**	0,055**						
	(2,977)	(3,124)						
$\Delta \ln(R/Y)$	-0,297***	-0,377***						
	(-5,449)	(-7,095)						
$\ln(L_A/L)$			0,174*	0,059**				
			(2,039)	(2,991)				
$\Delta \ln(L_A/L)$			-0,081	-0,074				
			(-0,920)	(-0,772)				
$\ln(L_A/TM)$					0,189*	0,031		
					(2,056)	(1,791)		
$\Delta \ln(L_A/TM)$					-0,080	-0,146		
					(-0,937)	(-1,488)		
$\ln(L_A/ENT)$							0,097	0,042**
							(1,209)	(3,006)
$\Delta \ln(L_A/ENT)$							-0,096	-0,063
							(-1,186)	(-0,725)
KV	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
Adj. R2	0,633	0,555	0,366	0,155	0,368	0,097	0,343	0,153

Taulukko 4. Kokonaistuottavuuden kasvua selittävän mallin tulokset: 9-vuotiset differenssit.

Ks. taulukon 3 selite. Viimeinen differenssi kuvaa aikaväliä 2008–2015.

Vastemuuttuja: $\Delta \ln A$								
$\ln(R/Y)$	0,281***	0,095**						
	(3,785)	(2,962)						
$\Delta \ln(R/Y)$	-0,257**	-0,437***						
	(-2,870)	(-5,393)						
$\ln(L_A/L)$			0,306*	0,104**				
			(2,235)	(2,893)				
$\Delta \ln(L_A/L)$			0,055	0,054				
			(0,425)	(0,360)				
$\ln(L_A/TM)$					0,336*	0,054		
					(2,328)	(1,661)		
$\Delta \ln(L_A/TM)$					0,049	-0,121		
					(0,338)	(-0,677)		
$\ln(L_A/ENT)$							0,178	0,073**
							(1,327)	(2,834)
$\Delta \ln(L_A/ENT)$							0,044	0,098
							(0,333)	(0,672)
KV	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>
Adj. R2	0,733	0,589	0,555	0,188	0,565	0,065	0,492	0,193

Aineisto ei siis tältä osin tue hypoteesia, jonka mukaan tasainen kokonaistuottavuuden kasvu edellyttäisi kasvavaa tutkimusintensiiteettiä, vaan yhteys on aineistossa osin jopa negatiivinen. Sen sijaan tutkimusintensiiteetin taso selittää aineiston perusteella kokonaistuottavuuden kasvuastetta aivan kuten schumpeterilaiset mallit ennustavat. Ajassa muuttuvia kontrollimuuttujia ei kuitenkaan ole käytetty, eikä ole selvää, miten niiden lisääminen vaikuttaisi tuloksiin.

6.3.3 Meta-tuotantofunktion suora estimointi

Yhtälön 6.8 estimoitava muoto on

$$\ln \dot{A}_{it}^P = \beta_{0i} + \beta_1 \ln L_{A,it} + \beta_2 \ln A_{it}^P + \beta_3 \ln F_{it} + TD + \varepsilon_{2,it}, \quad (6.19)$$

missä $\beta_1 = \gamma$, $\beta_2 = \theta$, $\beta_3 = (1 - \gamma - \theta)$, β_{0i} kuvaa toimialakohtaisia kiinteitä vaikutuksia, TD on toimialojen yhteinen aikadummy ja $\varepsilon_{2,it}$ stationaarinen virhetermi. Toimialakohtainen kiinteä vaikutus ottaa huomioon patentoinnin ja patenttien luonteen pysyvät erot eri toimialoilla, kun taas aikamuuttujalla pyritään ottamaan huomioon tarkasteluajan aikana tapahtuva yleinen patenttien luonteen muutos. Esimerkiksi tietotekniikka on saattanut muuttaa patenttien merkitystä ajan kuluessa.

Yhtälön 6.19 estimointi suoritetaan jälleen pienimmän neliösumman menetelmällä hyödyntäen muuttujien eri proxyja. Yhtälön molemmilla puolilla on $I(1)$ -termejä¹², mikä voi aiheuttaa ongelmia estimointiin. Muuttujien yhteisintegroituvuus on tällaisessa tapauksessa välttämätön ehto yhtälön mielekkäälle estimoinnille, joten yhteisintegroituvuus varmistetaan aluksi Pedronin (1999) kehittämällä seitsemän eri testin asetelmalla, jonka nollahypoteesi on ”ei yhteisintegroituvuutta”.¹³

Taulukossa 5 on esitetty estimoinnin tulokset. β_2 :n arvot ovat kaikissa tapauksissa alle yhden, joskin lähellä sitä. Neljässä tapauksessa kahdeksasta ero on Waldin testin perusteella tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,05. Kaikkein pienin kerroin on käytettäessä arvonlisäystä hyödykevariaatioiden proxyyna (0,821), ja suurin käytettäessä yritysten lukumäärää (0,972). Sen sijaan tutkimuspanoksen kerroin saa teorian vastaisesti kaikissa tapauksissa negatiivisen kertoimen, ja kuudessa tapauksessa kerroin on tilastollisesti merkitsevä. Hyödykevariaatioiden kerroin vaihtelee nollan molemmin puolin, mutta se on pääosin positiivinen ja tilastollisesti merkitsevä.

¹² Integroituvuus on testattu luvussa 6.3.1 esitetyillä paneeliyksikköjuuritesteillä. Tuloksia ei ole erikseen raportoitu.

¹³ Pedronin (1999) testien nollahypoteesi tulee hylätyksi tavanomaisilla merkitsevyystasoilla käyttäen kaikkia muuttujien eri proxyja. Tuloksia ei ole erikseen raportoitu.

Taulukko 5. Meta-tuotantofunktion suoran estimoinnin tulokset.

Taulukossa on esitetty yhtälön 6.19 riippumattomien muuttujien kertoimien estimoidut arvot. Kaikki muuttujat kattavat vuodet 1981–2015. Sulkuihin merkitty luku kuvaa t-testisuureen arvoa, ja merkinnät *, ** ja *** kuvaavat merkitsevyystasoja 0.05, 0.01 ja 0.001. Vakioterminä, aikadummyja ja kiinteitä vaikutuksia ei ole erikseen raportoitu. Alimmalla rivillä hakasulkuihin on merkitty Waldin testin p-arvo, kun testattava hypoteesi on $\alpha_2 = 1$. TD = aikadummyt, Adj. R2 = mallin korjattu selitysaste.

		Vastemuuttuja: $\ln \dot{A}^P$						
$\ln L_A$		-0,056**	-0,082**	-0,047**	-0,064**	-0,051**	-0,071**	
		(-3,207)	(-3,727)	(-2,713)	(-2,797)	(2,954)	(-3,110)	
$\ln R$	-0,026 (-1,518)	-0,047 (-1,888)						
$\ln A$	0,893*** (33,459)	0,821*** (27,985)	0,976*** (42,685)	0,949*** (45,485)	0,977*** (42,518)	0,889*** (45,335)	0,954*** (37,852)	0,972*** (27,523)
$\ln Y$	0,082*** (5,448)	0,101*** (4,276)						
$\ln L$		0,061* (2,115)	0,216*** (6,543)					
$\ln ENT$				-0,035 (-1,415)	0,071 (1,967)			
$\ln TM$						0,097* (2,114)	-0,092** (-2,926)	
TD	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>	<i>Ei</i>
Adj. R2	0,994	0,984	0,993	0,985	0,993	0,983	0,993	0,984
Wald: $\alpha_2 = 1$	[0,000]	[0,000]	[0,302]	[0,015]	[0,312]	[0,000]	[0,067]	[0,441]

Patenttiaineisto ei siis vahvista yksiselitteisesti kumpaakaan mallityyppiä, koska molemmat saavat osittaista tukea. Sen sijaan tutkimuspanoksen negatiivinen kerroin sotii molempien mallityyppien ennusteita vastaan. Tässäkin tapauksessa yhtälö on kuitenkin estimoitu ilman ajassa muuttuvia kontrollimuuttujia, ja niiden lisääminen voi vaikuttaa tuloksiin.

6.4 Tulkintaa ja huomioita

Endogeeniset kasvumallit eivät tarkastelun perusteella täysin sovi kuvaamaan Yhdysvaltojen teollisuuden toimialojen kokonaistuottavuuden ja innovoinnin kasvua, sillä aineisto käyttäytyy monin paikoin mallien oletuksia vastaan. Voidaan kuitenkin perustellusti sanoa, että aineisto tukee schumpeterilaisia malleja semi-endogeenisia malleja vahvemmin, eikä sellainen semi-endogeeninen kasvu, jossa

hyödykevariaatioiden määrä kasvaa ja tutkimuksen tuottavuus heikkenee, saa selkeää tukea yhdenkään tämän luvun tarkastelun perusteella.

Tutkimusintensiteetin kasvulla ei ole aiemmin selitetty kokonaistuottavuuden kasvua, mutta semi-endogeenisten mallien ennustamaa positiivista tilastollista yhteyttä ei muuttujien välille löydy. Tutkimusintensiteetti sen sijaan selittää tilastollisesti merkitsevällä tavalla eri toimialojen kasvuasteita aivan kuten schumpeterilaiset mallit ennustavat. Johtopäätös on sama kuin esimerkiksi Madsenilla (2008) sekä Ang & Madsenilla (2011).

Myöskään patenttiaineistoa käytettäessä ei voida hylätä schumpeterilaisten mallien hypoteesia $\theta = 1$. Tulokset eivät muutu juurikaan suhteessa Venturinin (2012) raportointiin tuloksiin, vaikka hyödykevariaatioita mitattaisiinkin suorilla mittareilla ja tutkimuspanosta efektiivisellä tutkijoiden määrällä. Tulokset ovat myös hyvin lähellä Neves & Sequeiran (2018) meta-analyysin muodostamaa arvioita parametrin θ suuruudesta. Kuitenkin myös hypoteesi $\theta < 1$ saa jonkinasteista tukea riippuen tarkasta estimoitavasta yhtälöstä ja proxyista.

Sen sijaan yksikköjuuritestit ovat vaikeammin tulkittavissa. Kokonaistuottavuuden kasvuaste on stationaarinen, mutta tutkimusintensiteetti ei ole, mikä sotii schumpeterilaisten mallien ennustetta vastaan. Tämä voi kuvastaa mallien yleistä epäsojivuutta kuvaamaan käytössä olevaa aineistoa. Toisaalta se voi kuitenkin johtua ainoastaan käytetyistä hyödykevariaatioiden proxyista, sillä keskimääräisen hyödykekohtaisen tutkimuspanoksen ja tutkimusintensiteetin aikatrendin suunta vaihtelee eri mittareiden välillä.

Patenttitarkastelussa havaittu tutkimuspanoksen negatiivinen kerroin voi samaan tapaan indikoida jonkinlaista yleistä endogeenisten mallien epäsojivuutta kuvaamaan innovointia käytetyssä aineistossa. Myös kokonaistuottavuuden kasvua selittävässä mallissa tutkimusintensiteetin kasvun kerroin osittain saa negatiivisia kertoimia, ja tämän ilmiön täytyy selittyä muilla tekijöillä. Tilanne on mahdollista tulkita esimerkiksi niin, että tutkimusintensiteetin kasvu aiheuttaa lyhyellä aikavälillä tuottavuusmenetyksiä, kun resursseista yhä suurempi osa allokoidaan tuotannollisen toiminnan sijaan T&K-toimintaan. Tätä tulkintaa tukee aineistossa se, että tutkimusintensiteetin kasvu on 5 vuoden aikaperiodeja tarkastellessa negatiivisessa yhteydessä kokonaistuottavuuden kasvuasteeseen, mutta yhteys kääntyy osin positiiviseksi 9 vuoden tarkasteluvälejä käyttäen. Patentoinnin osalta negatiivinen kerroin on vaikeampaa selittää, koska

esimerkiksi tulkinta, jonka mukaan patentointia tapahtuu enemmän tuotannollisen toiminnan kuin muodollisen T&K-toiminnan seurauksena, on jokseenkin epäuskottava.

Moni asia saattaa kuitenkin aiheuttaa tuloksiin merkittävää harhaa. Ensinnäkin myös muualla maailmassa tapahtuva tutkimus ja teknologinen kehitys läikkyi Yhdysvaltoihin, eikä sitä ole tarkastelussa erikseen kontrolloitu. Esimerkiksi Madsen (2008), Ang & Madsen (2011) ja Barcenilla-Visús ym. (2014) kontrolloivat ulkomailta tulevan tiedon läikkymistä termillä, joka mittaa muiden maiden T&K-toimintaa ja ulkomailta tulevaa korkean teknologian tuontia. On oletettavaa, että ulkomailta läikkyvän tiedon määrä on kasvanut muiden maiden kehittyessä ja kasvattaessa tutkimuspanostuksiaan. Luonnollisesti myös toimialojen välillä voi tapahtua tiedon läikkymistä.

Toiseksi tarkastelussa tulisi kontrolloida etäisyyttä teknologiarintaman kärkeen, sillä kärkeä jäljessä olevien maiden ja toimialojen on mahdollista kasvaa muita nopeammin. On luonnollisesti hyvin todennäköistä, ettei Yhdysvallat edusta kaikilla teollisuuden aloilla teknologiarintaman kärkeä. Aiemmassa kirjallisuudessa (Madsen 2008; Ang & Madsen 2011; Barcenilla-Visús ym. 2014) eroa rintaman kärkeen on kontrolloitu esimerkiksi kokonaistuottavuuden tason suhteellisella erolla kokonaistuottavuuden suurimpaan arvoon aineistossa.

Kolmas suuri ongelma on, että kokonaistuottavuus on hyvin epätarkka ja harhainen mittari teknologian kehitykselle eri alojen välillä, kuten jo Griliches (1979) on osoittanut. Aineistossa kokonaistuottavuus on määritelty hyvin yksinkertaisesti, ja muuttujien määritelmien muuttaminen voi muuttaa huomattavasti analyysin tuloksia. Ongelma on myös, että alakohtainen T&K-panos sisältyy jo tilinpidossa kokonaistuottavuuteen: tuotantofunktiossa T&K-työntekijät on yhtä lailla laskettu mukaan toimialojen työpanokseen ja T&K-toimintaan liittyvät pääomainvestoinnit sisältyvät pääomakantaan. Madsen (2008) tulkitseekin, että havaittu T&K-toiminnan vaikutus kokonaistuotantoon on eräänlainen ”ylimääräinen” vaikutus.

Neljänneksi suora innovoinnin, tutkimuksen ja hyödykevariaatioiden määrän kasvun mittaaminen on vaikeaa. Kaikkia uusia innovaatioita ei patentoida, ja innovointia tapahtuu myös muiden tekijöiden kuin muodollisen T&K-toiminnan seurauksena, mikä voi osaltaan vääristää tuloksia. Kaikki tutkimustyö ei myöskään sisälly muodolliseen T&K-toimintaan. Lisäksi kuten aiemmin todettua, hyödykevariaatioiden määrittäminen ja mittaaminen on äärimmäisen haastava tehtävä, ja esimerkiksi tässä luvussa käytetyt hyödykevariaatioiden proxyt antavat aivan erilaisen kuvan siitä, onko hyödykevariaatiota kohden laskettu tutkimuspanos kasvanut. Teoreettinen ongelma on myös, että joillakin

toimialoilla hyödykevariaatioiden määrä on itse asiassa vähentynyt käytetyillä mittareilla. Tämä ei ole erityisen mielekäs ilmiö teorian kannalta, eikä sellaista tilannetta ole malleissa kuvattu.

Lisäksi ongelmia aiheuttaa kokonaistuottavuuden kasvun ja T&K-panostusten myötäsyklisyyden aiheuttama endogeenisuus: voi olla, että korkea tutkimusintensiteetti on seurausta nimenomaan alan korkeasta tuottavuuskasvusta, kun kasvaneet resurssit käytetään suurempiin T&K-investointeihin. Tällöin kokonaistuottavuuden kasvun selittäminen tutkimusintensiteetillä tuottaa harhaisia tuloksia.

Yllä mainittujen ongelmien kontrolloiminen edellyttäisi laajempaa, usean maan ja usean toimialan paneeliaineiston käyttöä, jolloin havaintojen määrä olisi huomattavasti suurempi, yksittäiset poikkeavat alat eivät vaikuttaisi yhtä voimakkaasti tuloksiin ja eri puolilla maailmaa tapahtuvan tutkimuksen vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon. Kokonaistuottavuutta selittävissä mallissa differenssien olisi hyvä olla vieläkin pidempiä suhdannevaihteluiden suodattamiseksi. Lisäksi pelkkä patenttien lukumäärien tarkastelu jättää huomiotta niiden käytettävyyserot, mikä edellyttäisi esimerkiksi Venturinin (2012) tapaista laadun kontrollointia patenttien viittausmäärillä. Varsinkin patenttiaineistoa käytettäessä mikroperusteisten kontrollimuuttujien käyttö olisi suotavaa, sillä näiden avulla voidaan ottaa huomioon patentoijien välinen heterogeenisuus, kuten esimerkiksi Akcigit & Kerrin (2018), Acemoglun ym. (2018) sekä Akcigitin ym. (2017) tutkimuksissa.

Huomioitavaa myös on, ettei tavanomainen pienimmän neliösumman menetelmä välttämättä sovellu parhaiten tämänkaltaisten yhteisintegroituvuusrelaatioiden estimointiin, vaan endogeenisuutta voidaan kontrolloida dynaamisilla menetelmillä, kuten Stock & Watson (1993) tai Mark & Sul (2003).

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä tutkielmassa on tarkasteltu teknologista kehitystä endogeenisten talouskasvumallien avulla. Tutkielma on käynyt läpi ja vertaillut eri mallisukupolvien teoriaa, teoreettisia ongelmia sekä niiden aiemmin saamaa empiiristä tukea. Lisäksi aihetta on tutkittu uusien empiiristen esimerkein, joilla on pyritty jatkamaan Bloomin ym. (2020) havaitseman laskevan tutkimuksen tuottavuuden tarkastelua sekä selvittämään mallien soveltuvuutta kuvaamaan Yhdysvaltojen teollisuuden toimialojen tuottavuuskasvua ja innovointia.

Uusklassisten kasvumallien heikkous on, että tuottavuuden ja elintason pitkän aikavälin kasvuaste on pitkällä aikavälillä eksogeeninen muuttuja, eikä sitä voida selittää mallissa itsessään. Sen sijaan endogeenisten kasvumallien teoreettinen vahvuus liittyy teknologisen kehityksen ottamiseen osaksi mallia, sillä teknologista kehitystä selitetään niissä T&K-toiminnan ja kumuloituvan tiedon määrän avulla. Tämän mallikehikon avulla päästään teoreettisesti käsiksi myös pitkän aikavälin kasvuasteisiin vaikuttaviin tekijöihin.

Endogeenisten kasvumallien suurimmat teoreettiset ongelmat liittyvät mekanismeihin, joilla mallit pyrkivät rajoittamaan niin kutsuttuja skaalavaikutuksia. Nämä teknologian ei-kilpailullisuudesta ja läikkymisestä johtuvat skaalavaikutukset johtavat useissa mallien muotoiluissa räjähtävään kasvuasteeseen, mikä johtaa teoreettiseen ja empiiriseen umpikujaan. Skaalavaikutusten rajoittaminen johtaa puolestaan helposti endogeenisuuden kannalta ei-toivottuun johtopäätökseen, jonka mukaan teknologisen kehityksen asteeseen vaikuttaa pitkällä aikavälillä itse asiassa vain väestön kasvuaste, joka on pitkälti puhtaan eksogeeninen muuttuja.

Niin kutsutut schumpeterilaiset mallit ovat edustaneet endogeenisen kasvuteorian jonkinasteista konsensusta. Näissä malleissa yksittäisten teknologioiden kohdalla skaalavaikutus pätee, mutta uusien hyödykevariaatioiden synty jakaa tutkimuspanoksen yhä useamman erilaisen teknologian välille, eikä siten tuottavuuskasvu karkaa äärettömyyteen. Mallikehikko ennustaa, ettei tuottavuuden kasvuaste riipukaan tutkimuksen määrästä, vaan talouden tutkimusintensiteetistä, ja näin kasvu on puhtaan endogeenista. Schumpeterilaiset mallit ovat saaneet myös empiirisesti vahvinta tukea.

Bloomin ym. (2020) tarkastelu kuitenkin osoittaa, ettei skaalavaikutus näytä pätevän yksittäistenkään teknologioiden kohdalla, ja myös tämän tutkielman tuulivoimaa käsittelevä tarkastelu päättyy samaan johtopäätökseen. Innovoiminen todella vaikuttaa siis

vaikeutuneen, kun tutkimustoiminnan laajuutta verrataan epäsuorien mittarien sijaan suoriin teknologista kehitystä mittaaviin muuttujiin. Jos yksittäisten hyödykkeiden kohdalla innovointi todella vaikeutuu ja tutkimuksen tuottavuus heikkenee, tulisi endogeenisten mallien nojalla talouden tutkimusintensiteetin jatkuvasti kasvaa vakioisen kokonaistuottavuuden kasvuasteen ylläpitämiseksi. Tällainen tilanne ei kuitenkaan malleissa edusta talouden tasapainoista kasvu-uraa, vaan transitiodynamiikkaa. Aiemmassa kirjallisuudessa kokonaistuottavuuden kasvua ei ole selitetty tutkimusintensiteetin kasvuasteella, ja siten tämän tutkielman teollisuuden toimialojen kokonaistuottavuuden kasvuastetta selittävä malli tarjoaa aiheeseen uudenlaisen näkökulman.

Yhdysvaltojen teollisuuden toimialojen kokonaistuottavuuden kasvua ja patentointia käsittelevä empiirinen tarkastelu antaa kuitenkin aiemman kirjallisuuden tapaan tukea schumpeterilaisille malleille ja aiemmalle konsensukselle: kokonaistuottavuuden kasvuaste riippuu tilastollisesti merkitsevällä tavalla tutkimusintensiteetistä, joka kehittyy samaan tapaan hyödykevariaatiota kohden lasketun tutkimuspanoksen kanssa. Sellainen semi-endogeeninen kasvu, jossa tutkimusintensiteetin on jatkuvasti kasvettava kokonaistuottavuuden kasvun ylläpitämiseksi, ei saa lainkaan tukea. Patentointia tarkastellessa hypoteesia alakohtaisista skaalavaikutuksista ei myöskään voida hylätä.

Mistä mikrotason ja aggregaattitason empiiristen tulosten näennäinen ristiriita voi johtua? Ensinnäkin ongelma liittyy vahvasti kokonaistuottavuuden käsitteeseen, joka on hyvin heikko mittari teknologiselle kehitykselle. Näin ollen puhdasta teknologista kehitystä voidaan empiirisessä kirjallisuudessa käytetyissä malleissa mitata ja selittää hyvin heikosti. On lisäksi paljon sellaista teknologista kehitystä, joka ei millään tavalla löydy tietään tuottavuustilastoihin. Tämän takia Bloomin ym. (2020) sekä luvun 5 tarkastelun tapaiset suorat kehityksen mittarit ovat hyödyllisiä. Toisaalta kokonaistuottavuuden kanssa yhtä vertailukelpoista ja yleiskäyttöistä mittaria on haastavaa löytää.

Toiseksi kokonaistuottavuuden ja patenttien välinen yhteys on epäselvä, koska kaikki patentit eivät muutu kansantalouden tuottavuusparannuksiksi tai selkeäksi teknologian kehitykseksi. Patenttien luonne, laatu ja käytettävyys vaihtelevat alojen ja eri aikaperiodien välillä (Lanjouw and Schankerman 2004). Näin ollen patenttien soveltaminen meta-tuotantofunktion voi tuottaa vain hyvin epäsuoraa informaatiota.

Kolmas ongelma liittyy hyödykevariaatioiden käsitteeseen, joka on hyvin abstrakti ja vaikeasti mitattavissa. Tämä aiheuttaa epäselvyyksiä sen suhteen, millainen T&K-

toiminta on kategorisoitava teorian mukaan vertikaaliseksi ja millainen horisontaaliseksi innovoinniksi.

Neljänneksi on selvää, että eri alojen, teknologioiden ja maiden välillä tapahtuu tiedon ja T&K-toiminnan läikkymistä. Esimerkiksi Bloomin ym. (2020) esille nostama, Mooren lakiin ja puolijohteisiin liittyvä T&K-toiminta on varmasti hyödyttänyt myös monia muita aloja ja synnyttänyt uusia hyödykkeitä ja teknologioita. Samoin tuuliturbiinien tutkimus on hyödyttänyt monia muita aloja, eivätkä nämä tutkimuspanostukset siten ole kategorisoitavissa ainoastaan yhteen teknologiaan liittyviksi. On äärimmäisen vaikeaa tilastoida ja kategorisoida kaikki se tutkimustoiminta, joka yksittäisiin teknologioihin liittyy.

Tarkasteltaessa vain yksittäistä teknologiaa ja ilmiötä kerrallaan näyttää johtopäätös heikkenevästä tutkimuksen tuottavuudesta kuitenkin melko ilmeiseltä. Havaittu tutkijoiden tuottavuuden lasku on niin merkittävää, ettei se uskottavasti voi selittyä pelkästään tutkimustyön puitteiden ja laadun heikkenemisellä tai tutkimuskulttuurin muutoksilla. Tämä tutkimuskulttuurin muutos voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että T&K-toiminnassa keskitytään yhä enemmän erilaisilta riskeiltä suojelemiseen, mikä ei näy samalla tavalla mitattavissa olevana kehityksenä silloin, kun riskit eivät realisoidu.

Heikkenevä tutkimuksen tuottavuus ja innovoinnin vaikeutumisen aiheuttama stagnaatio voivat selvästi päteä vanhempien teknologioiden kohdalla. Sen sijaan aivan uusien ja innovatiivisten tuotteiden kohdalla jonkinlainen skaalavaikutus voi olla voimassa. Tämä tarkoittaisi, että yksittäisten teknologioiden kehitys noudattaisi eräänlaista S-käyrää: aluksi kehityksen aste on hidasta, sen jälkeen se kiihtyy ajan kuluessa ja tutkimuspanostusten kumuloituessa, ja lopulta kasvuaste kääntyy taas laskuun. Näin yksittäisiin teknologioihin liittyvät ideat ”kulutetaan loppuun”, minkä jälkeen syntyy taas uusia teknologioita omine S-käyrineen (Ayres 1988). Teknologinen kehitys noudattaa tällöin määrättyä syklejä, ja eräs tunnetuimmista teknologian pitkän aikavälin sykleihin liittyvistä malleista lienee Kondratjevin syklien teoria (ks. esim. Barnett 1998). Ajatus S-käyrästä on eri teknologioiden suhteen hyvin yleinen (Ayres 1988; Rogers 2003), mutta ei ole varsinaisesti löytänyt tietään valtavirtaiseen endogeeniseen kasvuteoriaan. Jonkinlaisen S-käyrän ylärajan saavuttaminen voisi osaltaan selittää 2010-luvulta alkaen jatkunutta niin kutsuttua sekulaaria stagnaatiota, kun kolmannen teollisen vallankumouksen aiheuttama kasvupotentiaali on kulutettu loppuun.

Endogeenisen kasvuteorian konsensuksen kannalta yksi suurin ongelma liittyy niin kutsutun lineaarisuuskritiikin lisäksi havaittavissa olevaan suureen empiiriseen

ristiriitaan maakohtaista aineistoa tarkastellessa. Schumpeterilaisten mallien mukaan vakioinen tuottavuuden kasvuaste voidaan ylläpitää vakioisella tutkimusintensiteetillä, mutta länsimaissa tutkimusintensiteetti on viimeisten vuosikymmenten aikana voimakkaasti noussut. OECD:n (2021b) mukaan esimerkiksi vuosina 1981–2019 on yhteenlaskettujen T&K-menojen suhde kokonaistuotantoon noussut Suomessa 1,15 prosentista 2,79 prosenttiin, Yhdysvalloissa 2,27 prosentista 3,07 prosenttiin ja OECD-maiden alueella 1,84 prosentista 2,47 prosenttiin. Lisäksi muualla maailmassa tehtävän tutkimuksen määrä ja tutkimusintensiteetti ovat kasvaneet vielä voimakkaammin. Esimerkiksi Kiinassa tutkimusintensiteetti on noussut 0,72 prosentista 2,23 prosenttiin vuosina 1991–2019. Jos tutkimusintensiteettiä mitataan T&K-työvoimaosuudella, on kasvu kaikkialla ollut tätäkin voimakkaampaa.

Kehitys ei siis selvästi edusta endogeenisten mallien tasapainoista kasvu-uraa, vaan kyse on pitkistä transitioperiodeista. Esimerkiksi Jones (2002) argumentoi, että viime vuosikymmenten kasvusta valtaosa selittyy transitiodynamiikalla. Samaan aikaan on kehittyneissä maissa havaittu jo aiemmin mainittu laskutrendi kokonaistuottavuuden kasvuasteessa. Tämä havainto tukee pintapuolisesti hypoteesia, jonka mukaan tasainen tuottavuuskasvu edellyttää tutkimusintensiteetin jatkuvaa kasvattamista, mutta hypoteesi vaatisi oman perusteellisen tarkastelunsa, jossa kokonaistuottavuuden kasvua selitetään tutkimusintensiteetillä ja sen kasvuasteella kontrolloiden kaikkien maiden suorittama tutkimus ja diffuusio. Yksinkertaiset schumpeterilaiset mallit eivät täysin voi kehitystä selittää.

OECD-maissa havaittavissa oleva empiirinen ristiriita voi toisaalta selittyä luonnollisesti myös länsimaiden rakennemuutoksella ja palveluvaltaistumisella. Myös Baumolin (1967) kustannustauti, jonka seurauksena heikon tuottavuuskasvun alojen osuus kansantuotteesta jatkuvasti kasvaa, voi selittää ilmiötä ja rajoittaa kasvuastetta. Baumolin taudin makrotaloudellisia vaikutuksia on empiirisesti käsitelty esimerkiksi Nordhaus (2008), ja ilmiön on yhdistänyt endogeeniseen kasvuteoriaan esimerkiksi Aghion ym. (2017) ja Bond-Smith (2019).

Jos semi-endogeenisten mallien johtopäätös, jonka mukaan tutkijoiden määrän on jatkuvasti kasvatettava, pitää paikkansa, seuraa maailman hidastuvasta väestönkasvusta ongelmia pitkän aikavälin tuottavuuskasvulle. Jones (2020) on tutkinut, mitä endogeenisten kasvumallien kehikossa tapahtuu väestönkasvun kääntyessä negatiiviseksi, ja lopputulos on ilmeinen: kehitys päättyy täydelliseen stagnaatioon. On kuitenkin selvää, että tämänkaltainen tarkastelu pätee vain käsiteltäessä hyvin pitkiä, jopa

vuosisadan mittaisia aikaperiodeja. Stagnaatio tapahtuu vasta, kun muut kehityksen lähteet on ammennettu loppuun. Näitä lähteitä ovat esimerkiksi tutkimuksen määrän ja tutkimusintensiteetin kasvattaminen, koulutus ja henkisen pääoman kerryttäminen sekä innovoinnin muiden edellytysten parantaminen. Näiden tekijöiden kasvulle löytyy valtava potentiaali esimerkiksi kehittyvistä maista, joiden T&K-panostukset hyödyttävät teknologian ei-kilpailullisuuden seurauksena koko maailmaa. Kasvun edellytysten täydellinen tyrehtyminen ei siis ole näköpiirissä semi-endogeenisten mallien ei-toivotuilta vaikuttavista johtopäätöksistä huolimatta.

On myös muita huomiotta jääneitä tekijöitä, jotka semi-endogeenisenkin kasvun pätiessä saattavat ylläpitää teknologisen kehityksen edellytyksiä. Jos tekoälyn avulla voidaan suorittaa osa T&K-toiminnasta, voi tutkimuspanos teoriassa kasvaa rajatta myös ilman väestönkasvua. Tällaista mahdollisuutta ja sen implikaatioita ovat käsitelleet esimerkiksi Aghion ym. (2017). Toisaalta myös tuotannon kautta tapahtuva tekemällä oppiminen on jäänyt endogeenisen kasvun teoriassa vähälle huomiolle, vaikka esimerkiksi Arrow'n (1962) proto-endogeeninen malli perustuu nimenomaan tekemällä oppimiseen. Thompson (2010) huomauttaa, että tekemällä oppimiseen perustuvat mallit ottivat erilaisen suunnan juuri samoihin aikoihin, kun endogeeninen kasvuteoria sai syntynsä, eikä tekemällä oppimista siten löydy endogeenisen kasvun kirjallisuudesta. Thompson (2010) myös huomauttaa, että uskottava pitkän aikavälin kasvua selittävä empiirinen malli yhdistää passiivisen tekemällä oppimisen ja muut teknologisen kehityksen lähteet.

Endogeenisen kasvun teorian ja empirian tulevaisuus vaikuttaa valoisalta, koska Peretton (2018) neljännen sukupolven malleissa aiemmista lineaarisuusrajoitteista on vihdoin irtauduttu, ja muotoilu odottaa uusia empiirisiä kokeiluja. Lisäksi uudet kattavat mikroaineistot avaavat yhä parempia mahdollisuuksia innovoinnin ja T&K-toiminnan eri ulottuvuuksien tarkasteluun (Ackeigist ym. 2019). Tämä on suuri edistysaskel, koska innovointi ja teknologian kehitys ovat äärimmäisen monen eri tekijän seurausta, ja yksinkertaiset, talouden suuria aggregaatteja kuvaavat mallit sopivat hyvin rajoittuneesti kuvaamaan innovointiin vaikuttavia prosesseja. Jatkotutkimuksissa voitaisiin käyttää esimerkiksi yksittäisen suomalaisen toimialan yritys kohtaista mikroaineistoa, jonka avulla voidaan selvittää tarkemmin erilaisten T&K-panostuksien yhteyttä innovaatioihin, patentteihin ja tuottavuusparannuksiin. Lisäksi aineiston avulla voitaisiin tarkemmin selvittää tiedon läikkymisen tapoja toimialan sisällä.

Lopullisten päätelmien tekeminen siitä, onko innovointi ja eksponentiaalisen kasvun aikaansaaminen yhä vaikeampaa, edellyttää edelleen lisää tutkimusta. On kuitenkin joka tapauksessa selvää, että talouden T&K-panostuksilla on merkittäviä hyvinvointivaikutuksia. On mahdollista, ettei pitkän aikavälin kasvuasteisiin voida vaikuttaa T&K-toiminnan tukemisella, mutta sen sijaan hyvinvoinnin ja teknologian tasoon voidaan.

LÄHTEET

- Abdih, Y. – Joutz, F. (2006) Relating the knowledge production function to total factor productivity: an endogenous growth puzzle. *IMF Staff Papers*, Vol. 53 (2), 242–271.
- Acemoglu, D. (2009). *Introduction to modern economic growth*. Princeton University Press. Princeton, NJ.
- Acemoglu, D. – Aghion, P. – Zilibotti, F. (2006) Distance to Frontier, Selection, and Economic Growth. *Journal of the European Economic Association*, Vol. 4 (1), 37–74.
- Acemoglu, D. – Akcigit, U. – Alp, H. – Bloom, N. – Kerr, W.R. (2018). Innovation, reallocation, and growth. *American Economic Review*, Vol. 108 (11), 3450–3491.
- Aghion, P. – Howitt, P. (1992) A model of growth through creative destruction. *Econometrica*, Vol. 60 (2), 323–351.
- Aghion, P. – Howitt, P. (1998) *Endogenous growth theory*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Aghion, P. – Howitt, P. (2009) *The Economics of Growth*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Aghion, P. – Jones, B.F. – Jones, C.I. (2017) Artificial intelligence and economic growth. NBER Working Paper No. 23928, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Akcigit, U. – Grigsby, J. – Nicholas, T. (2017) The rise of American ingenuity: innovation and inventors of the golden age. NBER Working Paper No. 23047, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Akcigit, U. – Kerr, W.R. (2018). Growth through heterogeneous innovations. *Journal of Political Economy*, Vol 126 (4), 1374–1443.
- Akcigit, U. – Nicholas, T. (2019) History, Microdata, and Endogenous Growth. *Annual Review of Economics*, Vol. 11 (1), 615–633.
- Ang, J. – Madsen, J. (2011) Can second-generation endogenous growth models explain productivity trends and knowledge production in the Asian miracle economies? *Review of Economics and Statistics*, Vol. 93 (4), 1360–1373.
- Ang, J. – Madsen, J. (2015) What drives ideas production across the world? *Macroeconomic Dynamics*, Vol. 19 (1), 79–115.
- van Ark, B. (2016), The Productivity Paradox of the New Digital Economy. *International Productivity Monitor*, No. 31, 3–18.

- Arrow, K.J. (1962) The economic implications of learning-by-doing. *Review of Economic Studies*, Vol. 29 (1), 155–173.
- Ayres, R.U. (1988) Barriers and breakthroughs: an "expanding frontiers" model of the technology-industry life cycle. *Technovation*, Vol. 7 (2), 87–115.
- Barcenilla-Visús, S. – López-Pueyo, C. – Sanaú-Villarroya, J. (2014) Semi-endogenous versus fully endogenous growth theory: a sectoral approach. *Journal of Applied Economics*, Vol. 17 (1), 1–30.
- Barnett, V. (1998) *Kondratiev and the Dynamics of Economic Development*. Macmillan, London.
- Barro, R. – Sala-i-Martin, X. (2004). *Economic growth*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Baumol, W. (1967) Macroeconomics of unbalanced growth: the anatomy of urban crisis. *American Economic Review*, Vol. 57 (3), 415–426.
- Bergeaud, A. – Cette, G. – Lecat, R. (2016) Productivity trends from 1890 to 2012 in advanced countries. *Review of Income and Wealth*, Vol. 62 (3), 420–444.
- Bloom, N. – Jones, C.I. – Van Reenen, J. – Webb, M. (2020) Are Ideas Getting Harder to Find? *American Economic Review*, Vol. 110 (4), 1104–1144.
- Bond-Smith, S. (2019) The decades-long dispute over scale effects in the theory of economic growth. *Journal of economic surveys*, Vol. 33 (5), 1359–1388.
- Broda, C. – Weinstein, D. (2006) Globalization and the gains from variety. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 121 (2), 541–585.
- Byrne, D.M. – Fernald, J.G. – Reinsdorf, M.B. (2016) Does the United States have a Productivity Slowdown or a Measurement Problem? *Brookings Papers on Economic Activity*, Vol. 47 (1), 109–182.
- Ceruzzi, P.E. (2003) *A History of Modern Computing*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Choi, I. (2001) Unit Root Tests for Panel Data. *Journal of International Money and Finance*, Vol. 20 (2), 249–272.
- Cowen, T. (2011) *The Great Stagnation: How America Ate All the Low-Hanging Fruit of Modern History, Got Sick, and Will (Eventually) Feel Better*. Dutton, New York, NY.
- Decker, R.A. – Haltiwanger, J. – Jarmin, R.S. – Miranda, J. (2016) Declining Business Dynamism: What We Know and the Way Forward. *American Economic Review*, Vol. 106 (5), 203–207.
- Dinopoulos, E. – Thompson, P. (1998) Schumpeterian growth without scale effects. *Journal of Economic Growth*, Vol. 3 (4), 313–335.

- Eichengreen, B. – Park, D. – Shin, K. (2015) The Global Productivity Slump: Common and Country-Specific Factors. NBER Working Paper No. 21556, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Elia, A. – Taylor, M. – Ó Gallachóir, B. – Rogan, F. (2020) Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers. *Energy Policy*, Vol. 147, 111912.
- Energistyrelsen (2021) Data on operating and decommissioned wind turbines. Energistyrelsen, København. <<https://ens.dk/en/our-services/statistics-data-key-figures-and-energy-maps/overview-energy-sector>>, haettu 19.3.2021.
- Ethier, W.J. (1982) National and international returns to scale in the modern theory of international trade. *American Economic Review*, Vol. 72 (3), 389–405.
- EU Industrial R&D Scoreboard. European Commission, Luxemburg. <<https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard>>, haettu 19.3.2021.
- EU KLEMS. September 2017 release, Revised July 2018. The conference Board, New York, NY. <<http://www.euklems.net>>, haettu 19.3.2021.
- Feenstra, R.C. (1994) New product varieties and the measurement of international prices. *American Economic Review*, Vol. 84 (1), 157–177.
- Furman, J.L. – Porter, M.E. – Stern, S. (2002) The determinants of national innovative capacity. *Research Policy*, Vol. 31 (6), 899–933.
- Galor, O. – Weil, D.N. (2000) Population, technology, and growth: from Malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. *American Economic Review*, Vol. 90 (4), 806–828.
- Gao, G. – Hitt, L.M. (2004) Information technology and product variety: Evidence from panel data. *ICIS 2004 Proceedings* 29.
- Gordon, R.J. (2015) Secular Stagnation: A Supply-Side View. *American Economic Review*, Vol. 105 (5), 54–59.
- Gordon, R.J. (2016) *The Rise and Fall of American Growth: The US Standard of Living since the Civil War*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Griliches, Z. (1979) ‘Issues in Assessing the Contribution of Research and Development to Productivity Growth. *Bell Journal of Economics*, Vol. 10 (1), 92–116.
- Griliches, Z. (1990). Patent Statistics as Economic Indicators: A Survey. *Journal of Economic Literature*, Vol. 28 (4), 1661–1707.
- Griliches, Z. (1994) Productivity, R&D and the Data Constraint. *American Economic Review*, Vol. 84 (1), 1–23.

- Grossman, G.M. – Helpman, E. (1991) *Innovation and growth in the global economy*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Growiec, J. (2007) Beyond the linearity critique: the knife-edge assumption of steady-state growth. *Economic Theory*, Vol. 31 (3), 489–499.
- Ha, J. – Howitt, P. (2007) Accounting for trends in productivity and R&D: a Schumpeterian critique of semi-endogenous growth theory. *Journal of Money, Credit and Banking*, Vol. 39 (4), 733–774.
- Ha, J. – Kim, Y.J. – J.-W. Lee, (2009) The Optimal Structure of Technology Adoption and Creation: Basic Research vs. Development in the Presence of Distance to Frontier. ADB Economics Working Paper No. 163, Asian Development Bank, Manila.
- Hall, B.H. – Mairesse, J. (1995) Exploring the relationship between R&D and productivity in French manufacturing firms. *Journal of Econometrics*, Vol. 65 (1), 263–293.
- Howitt, P. (1999) Steady endogenous growth with population and R. & D. inputs growing. *Journal of Political Economy*, Vol- 107 (4), 715–730.
- Hu, M. – Mathews, J. (2005) National innovative capacity in East Asia. *Research Policy*, Vol. 34 (9), 1322–1349.
- Hu, M. – Mathews, J. (2008) China's national innovative capacity. *Research Policy*, Vol. 37 (9), 1465–1479.
- IEA (2020) Energy Technology RD&D Budgets 2020. International Energy Association, Paris. <<https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2020>>, haettu 19.3.2021.
- IEA (2021) Energy Technology RD&D Budget Database. International Energy Association, Paris. <<https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/energy-technology-rdd>>, haettu 19.3.2021.
- IRENA (2020) *Renewable Power Generation Costs in 2019*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <<https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>>, haettu 19.3.2021.
- Jones, B.F. (2009) The Burden of Knowledge and the ‘Death of the Renaissance Man’: Is Innovation Getting Harder? *Review of Economic Studies*, Vol. 76 (1), 283–317.
- Jones, B.F. (2010) Age and Great Invention. *Review of Economics and Statistics*, Vol. 92 (1), 1–14.

- Jones, C.I. (1995a) R & D-based models of economic growth. *Journal of Political Economy*, Vol. 103 (4), 759–784.
- Jones, C.I. (1995b) Time series tests of endogenous growth models. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110 (2), 495–525.
- Jones, C.I. (1999) Growth: with or without scale effects? *American Economic Review*, Vol. 89 (2), 139–144.
- Jones, C.I. (2002) Sources of U.S. economic growth in a world of ideas. *American Economic Review*, Vol. 92 (1), 220–239.
- Jones, C.I. (2020) The End of Economic Growth? Unintended Consequences of a Declining Population. NBER Working Paper No. 26651, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Jones, C.I. – Williams, J.C. (1998) Measuring the social return to R&D. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 113 (4), 1119–1135.
- Klenow, P. – Bils, M. (2001) The acceleration in variety growth. *American economic Review*, Vol. 91 (2), 274–280.
- Kogan, L. – Papanikolaou, D. – Seru, A. – Stoffman, N. (2017) Technological Innovation, Resource Allocation, and Growth. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 132 (2), 665–712.
- Kortum, S. (1997) Research, Patenting, and Technological Change. *Econometrica*, Vol. 65 (6), 1389–1419.
- Kortum, S. – Lerner, J. (1998) Stronger Protection or Technological Revolution: What Is behind the Recent Surge in Patenting? *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, Vol. 48 (1), 247–304.
- Kremer, M. (1993) Population growth and technological change: One million B.C. to 1990. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 108 (3), 681–716.
- Laincz, C. – Peretto, P.F. (2006) Scale effects in endogenous growth theory: an error of aggregation, not specification. *Journal of Economic Growth*, Vol. 11 (3), 263–288.
- Lanjouw, J.O. – Schankerman, M. (2004) Patent Quality and Research Productivity: Measuring Innovation with Multiple Indicators. *Economic Journal*, Vol. 114 (495): 441–465.
- Levin, A. – Lin, C.F. – Chu, C. (2002) Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite-Sample Properties. *Journal of Econometrics*, Vol. 108 (1), 1–24.

- Li, C.-W. (2000) Endogenous vs. semi-endogenous growth in a two-R&D-sector model. *Economic Journal*, Vol. 110 (462), 109–122.
- Lucas, R.E., Jr. (1988) On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics*, Vol. 22 (1), 3–42.
- Luintel, K.B. – Khan, M. (2009) Heterogeneous ideas production and endogenous growth: an empirical investigation. *Canadian Journal of Economics*, Vol. 42 (3), 1176–1205.
- Lybbert, T.J. – Zolas, N.J. (2014) Getting patents and economic data to speak to each other: An ‘Algorithmic Links with Probabilities’ approach for joint analyses of patenting and economic activity. *Research Policy*, Vol. 43 (3), 530–542.
- Maddala, G.S. – Wu, S. (1999) A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 61 (S1), 631–652.
- Madsen, J. (2008) Semi-endogenous versus Schumpeterian growth models: testing the knowledge production function using international data. *Journal of Economic Growth*, Vol. 13 (1), 1–26.
- Madsen, J. – Saxena, S. – Ang, J. (2010) The Indian growth miracle and endogenous growth. *Journal of Development Economics*, Vol. 93 (1), 37–48.
- Mankiw, N.G. (1995) The Growth of Nations. *Brookings Papers on Economic Activity*, Vol. 26 (1), 275–326.
- Mark, N. – Sul, D. (2003) Cointegration vector estimation by Panel DOLS and long-run money demand. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 65 (5), 655–680.
- Nemet, G.F. – Kammen, D.M. (2007) U.S. energy research and development: Declining investment, increasing need, and the feasibility of expansion. *Energy Policy*, Vol. 35 (1), 746–755.
- Neves, P.C. – Sequeira, T.N. (2018) Spillovers in the production of knowledge: a meta-regression analysis. *Research Policy*, Vol. 47 (4), 750–767.
- Nordhaus, W.D. (2008) Baumol’s diseases: a macroeconomic perspective. *BE Journal of Macroeconomics*, Vol. 8 (1), 1–39.
- OECD (2021a) Average annual wages. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. <<https://stats.oecd.org>>, haettu 19.3.2021.
- OECD (2021b) Main Science and Technology Indicators. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. <<https://stats.oecd.org>>, haettu 19.3.2021.

- OECD (2021c) SDBS Business Demography Indicators (ISIC Rev. 3). Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. <<https://stats.oecd.org>>, haettu 19.3.2021.
- OECD (2021d) STAN Industrial Analysis (2020 ed.). Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. <<https://stats.oecd.org>>, haettu 19.3.2021.
- Our World in Data (2020) Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? Hannah Ritchie. <<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>>, haettu 17.5.2019.
- PATSTAT. 2020 Autumn Edition. European Patent Office, Munich. <<https://data.epo.org/expert-services/index.html>>, haettu 19.3.2021.
- Pedroni, P. (1999) Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 61 (S1), 653–670.
- Peretto, P.F. (1998) Technological change and population growth. *Journal of Economic Growth*, Vol. 3 (4), 283–311.
- Peretto, P.F. (2016) A note on the second linearity critique. <<http://public.econ.duke.edu/~peretto/A%20note%20on%20the%20second%20linearity%20critique.pdf>>, haettu 19.3.2021.
- Peretto, P.F. (2018) Robust endogenous growth. *European Economic Review*, Vol. 108 (3), 49–77.
- Pesaran, M.H (2004) General diagnostic tests for cross-section dependence in panels. IZA Discussion Paper No. 1240, Institute of Labor Economics, Bonn.
- Pesaran, M.H. (2007) A simple panel unit test in the presence of cross section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 22 (2), 265–312.
- Pessoa, A. (2010) R&D and economic growth: How strong is the link? *Economics Letters*, Vol. 107 (2), 152–154.
- Pizer, W. – Popp, D. (2008) Endogenizing technological change: Matching empirical evidence to modeling needs. *Energy Economics*, Vol. 30 (6), 2754–2770.
- Porter, M. – Stern, S. (2000) Measuring the “Ideas” production function: Evidence from international patent output. NBER Working Paper No. 7891, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Ramzi, T. – Salah, A. (2018) The determinants of innovation capacity in the less innovative countries in the Euro-Mediterranean region. *Journal of the Knowledge Economy*, Vol. 9 (2), 526–543.

- Rogers, E. (2003) *Diffusion of Innovations*. 5th Edition. Free Press, New York.
- Romer, P.M. (1986) Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, Vol. 94 (5), 1002–1037.
- Romer, P.M. (1990) Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, Vol. 98 (5), 71–102.
- Romer, P.M. (2012) *Advanced Macroeconomics*. 4th Edition. McGraw-Hill, New York, NY.
- Rosenberg, N. (1976) *Perspectives on Technology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schumpeter, J.A. (1942) *Capitalism, Socialism, and Democracy*. Harper, New York.
- Scopus. Elsevier, Amsterdam. <<https://www.scopus.com>>, haettu 19.3.2021.
- Sedgley, N. – Elmslie, B. (2010) Reinterpreting the Jones critique: a time series approach to testing and understanding idea driven growth models with transitional dynamics. *Journal of Macroeconomics*, Vol. 32 (1), 103–117.
- Segerstrom, P.S. (1998) Endogenous growth without scale effects. *American Economic Review*, Vol. 88 (5):, 1290–1310.
- Sequeira, T.N. – Neves, P.C. (2020) Stepping on Toes in the Production of Knowledge: a Meta-Regression Analysis. *Applied Economics*, Vol. 52 (3), 260–274.
- Shell, K. (1967) A Model of Inventive Activity and Capital Accumulation. Teoksessa: *Essays on the Theory of Optimal Economic Growth*, toim. K. Shell, 67–85. MIT Press, Cambridge, MA.
- Solow, R.M. (1956) A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70 (1), 65–94.
- Solow, R.M. (1957) Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics* 39 (3), 312–320.
- Solow, R.M. (1987) We'd better watch out. *New York Times* 12.7.1987, 36.
- Stock, J.H. – Watson, M.W. (1993) A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems. *Econometrica*, Vol. 61 (4), 783–820.
- Strulik, H. – Prettnner, K. – Prskawetz, A. (2013) The past and future of knowledge-based growth. *Journal of Economic Growth*, Vol. 18 (4), 411–437.
- Swan, T.W. (1956) Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, Vol. 32 (2), 334–361.

- Syverson, C. (2016) Challenges to Mismeasurement Explanations for the U.S. Productivity Slowdown. NBER Working Paper No. 21974, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- The New Yorker 28.11.2011 No death, no taxes. <<https://www.newyorker.com/magazine/2011/11/28/no-death-no-taxes>>, haettu 30.1.2021.
- Thompson, P. (2010) Learning by Doing. Teoksessa: *Handbook of the Economics of Innovation*, toim. B.H. Hall – N. Rosenberg, 429–476. Elsevier, Amsterdam.
- Thresher, R. – Robinson, M. – Veers, P. (2008) Wind Energy Technology: Current Status and R&D Future. NREL Conference Paper, NREL/CP-500-43374, National Renewable Energy Laboratory, Denver, CO.
- Tilastokeskus (2021) Käsitteet ja määritelmät. <<https://www.stat.fi/til/tkke/kas.html>>, haettu 30.1.2021.
- Ulku, H. (2007) R&D, innovation, and growth: evidence from four manufacturing sectors in OECD countries. *Oxford Economic Papers*, Vol. 59 (3), 513–535.
- UNIDO (2020) INDSTAT 2 2020, ISIC Revision 3. United Nations Industrial Development Organization, Wien. <<https://stat.unido.org>>, haettu 19.3.2021.
- USCB (2020) Historical Income Tables: People. United States Census Bureau, Suitland, MD. <<https://www.census.gov/data/tables/time-series/demo/income-poverty/historical-income-people.html>>, haettu 19.3.2021.
- USPTO (2020a) Patent Examination Research Dataset (Public PAIR). 2019 Release. United States Patent and Trademark Office, Alexandria, VA. <<https://www.uspto.gov/learning-and-resources/electronic-data-products/patent-examination-research-dataset-public-pair>>, haettu 19.3.2021.
- USPTO (2020b) Trademark Case Files Dataset. 2019 Release. United States Patent and Trademark Office, Alexandria, VA. <<https://www.uspto.gov/learning-and-resources/electronic-data-products/trademark-case-files-dataset-0>>, haettu 19.3.2021.
- Uzawa, H. (1965) Optimum Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth. *International Economic Review*, Vol. 6 (1), 18–31.
- Venturini, F. (2012) Product variety, product quality, and evidence of endogenous growth. *Economics Letters*, Vol. 117 (1), 74–77.

- Webb, M. – Short, N. – Bloom, N. – Lerner, J. (2018) Some Facts of High-Tech Patenting. NBER Working Paper No. 24793, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Wiesenthal T. – Leduc, G. – Schwarz, H. – Haegeman K. (2009) R&D Investment in the Priority Technologies of the European Strategic Energy Technology Plan. JRC Working Paper, JRC52225, European Commission, Luxemburg.
- Wiser, R. – Bolinger, M. (2019) 2018 Wind Technologies Market Report. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. <https://escholarship.org/uc/item/2tc1819q>, haettu 19.3.2021.
- Ying, L.G. (2008) The shape of ideas production function in transition and developing economies: Evidence from China. *International Regional Science Review*, Vol. 31 (2), 185–206.
- Young, A. (1998) Growth without Scale Effects. *Journal of Political Economy*, Vol. 106 (1), 41–63.

LIITTEET

Liite 1. Tuuliturbiineja valmistavat yritykset ja T&K-menot

Tuuliturbiinien yksityisten T&K-menojen arvioimisessa on hyödynnetty useita erilaisia lähestymistapoja samaan tapaan kuin Wiesenthal ym. (2009). Useat tuuliturbiinien markkinan suurimmat toimijat ovat erikoistuneet pelkkään tuulienergiaan, jolloin kaikki yrityksen T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan liittyviksi. Usealla toimialalla toimivien yritysten tuulienergiaan liittyvät T&K-menot on puolestaan arvioitu eri osastojen liikevaihtojen ja patenttien osuuksien avulla. Puuttuvat havainnot on tarvittaessa ekstrapoloitu geometrisesti tai lineaarisesti. Ulkomaisissa valuutoissa ilmaistut suuret on tarvittaessa muutettu euroiksi, ja valuuttakurssien laskemisessa on hyödynnetty kunkin kalenterivuoden viimeisenä päivänä vallitsevaa valuuttakurssia. Tarkasteltava aikaväli on 2000–2019.

Yritys	Huomioita
Acciona	T&K-menot ja liikevaihto on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen tuulienergiaan allokoitujen T&K-menojen on arvioitu tuulienergiaan liittyvän liiketoiminnan osuudella koko liikevaihdosta. Tuulienergian on oletettu muodostavan 50 % energialiiketoiminnasta. Vuosilta, joilta tietoja eri osastojen liikevaihdoista ei ole saatavilla, on tuulienergian osuudeksi arvioitu 20 % koko liiketoiminnasta. Accionan tuulienergiaan liittyvä liiketoiminta yhdistyi Nordexin kanssa 2016.
Alstom	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen tuulienergiaan allokoitujen T&K-menojen on arvioitu vuosittaisen tuulienergiaan liittyvien patenttihakemusten (patenttiluokitus F03D) osuudella kaikista yrityksen hakemuksista PATSTAT-tietokannassa. Alstomin tuulienergiaan liittyvä liiketoiminta alkoi 2007 Ecotècnian yritysoston myötä. Toiminta yhdistyi GE:n kanssa 2016.
Bonus Energy	Yrityksen tuulienergiaan liittyvä toiminta loppui 2004 Siemensin ostaessa yrityksen. Vuosien 2000–2003 T&K-menoiksi on arvioitu sama määrä kuin Siemensin vuoden 2004 tuulivoimaan liittyvät T&K-menot.
Clipper Windpower	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta. Yrityksen toiminta alkoi 2001 ja tuulienergiaan liittyvä toiminta käytännössä loppui 2012.
Ecotècnia	Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi, ja menoiksi on arvioitu 2 % yrityksen liikevaihdosta. Liikevaihto on kerätty

	yrittäjien vuosiraporteista ja uutisartikkeleista. Alstom osti Ecotécian vuonna 2007.
Enercon	Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi, ja menoiksi on arvioitu 2 % yrityksen liikevaihdosta. Liikevaihto on kerätty uutisartikkeleista, sillä yritys ei julkaise tietoja vuosikertomuksissaan.
Enron	Yrityksen tuulienergiaan liittyvä toiminta loppui 2002 GE:n ostaessa yrityksen. Vuosien 2000 ja 2001 T&K-menoiksi on arvioitu sama määrä kuin GE:n vuoden 2002 tuulivoimaan liittyvät T&K-menot.
Gamesa (Siemens Gamesa 2017–)	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Toiminta yhdistyi Siemensin tuulienergiaan liittyvän liiketoiminnan kanssa 2017, jolloin syntyi Siemens Gamesa.
GE	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen tuulienergiaan allokoitujen T&K-menot on arvioitu eri osastojen liikevaihtojen osuuksien avulla, sekä vuosittaisen tuulienergiaan liittyvien patenttihakemusten (patenttiluokitus F03D) osuudella kaikista yrityksen hakemuksista PATSTAT-tietokannassa. GE:n tuulienergiaan liittyvä toiminta alkoi 2002 Enronin yritystön myötä. Vuonna 2016 Alstomin tuulienergiaosasto yhdistyi GE:n kanssa, ja vuonna 2017 GE osti LM Wind Powerin.
Goldwind	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi.
LM Wind Power	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. GE osti LM Wind Powerin vuonna 2017.
MHI Vestas Offshore	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Yrityksen toiminta alkoi 2014 Mitsubishi Heavy Industriesin ja Vestasin yhteisyrityksenä, ja sen T&K-menot on laskettu kumpaankin emoyhtiöön nähden erillisinä.
Mingyang Wind Power	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Yrityksen toiminta alkoi vuonna 2007.
Mitsubishi Heavy Industries	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen tuulienergiaan allokoitujen T&K-menot on arvioitu vuosittaisen tuulienergiaan liittyvien patenttihakemusten (patenttiluokitus F03D) osuudella kaikista yrityksen hakemuksista PATSTAT-tietokannassa.

NEG Micon	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Vestas osti yrityksen vuonna 2004.
Nordex	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Nordex osti Accionan tuulitenergiaan liittyvän liiketoiminnan vuonna 2016.
REpower Systems (Senvion 2014–)	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Yritys oli Suzlonin omistuksessa 2007–2015, mutta myös tälle aikavälille REpower Systemsin omat T&K-menot on laskettu erikseen sen omista vuosiraporteista. Tälle aikavälille menot on jätetty huomiotta Suzlonin yhteenlaskettujen T&K-menojen laskuista kaksinkertaisen laskemisen välttämiseksi. Yritys siirtyi Siemens Gamesan omistukseen 2019.
Siemens (Siemens Gamesa 2017–)	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen tuulienergiaan allokoituiden T&K-menot on arvioitu vuosittaisen tuulienergiaan liittyvien patenttihakemusten (patenttiluokitus F03D) osuudella kaikista yrityksen hakemuksista PATSTAT-tietokannassa. Siemensin tuulienergiaan liittyvä liiketoiminta alkoi 2004 Bonus Energyn yritysoston myötä. Vuonna 2017 Siemensin tuulienergiaan liittyvä liiketoiminta yhdistyi Gamesan kanssa ja syntyi Siemens Gamesa. Senvion siirtyi Siemens Gamesan omistukseen 2019.
Suzlon	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. REpower Systems oli Suzlonin omistuksessa 2007–2015, mutta molempien menot on laskettu erillisinä.
Vestas	T&K-menot on kerätty EU Industrial R&D Scoreboard -tietokannasta ja yrityksen vuosiraporteista. Yrityksen kaikki T&K-menot on arvioitu tuulienergiaan kuuluviksi. Vestas osti NEG Miconin vuonna 2004.